

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Anàlisi d'harmònics en tensió i corrent d'una planta de *crushing* al port de Barcelona

MEMÒRIA

Autor: Jordi Castella Barrera
Director: Luis Sainz Sopera
Ponent: Joan Cardús Martínez
Convocatòria: Juny 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Garantir una bona qualitat elèctrica en una instal·lació industrial és un objectiu fonamental de qualsevol departament de manteniment. En aquest projecte, es mostra tota la cadena de raonament, que comença amb la detecció d'una anomalia elèctrica concreta i finalitza amb la proposta d'una solució específica. Particularment, es pretén estudiar l'impacte que tenen els harmònics en la qualitat elèctrica de la planta de *crushing* de *Bunge Iberica* al port de Barcelona.

Per poder encarar el problema s'han d'assumir unes hipòtesis que permetin simplificar la realitat. Per tant, és necessari comprendre la naturalesa i funcionament de la instal·lació per definir adequadament les hipòtesis. Aquest és l'objectiu de la modelització de la instal·lació.

Una vegada s'ha modelitzat la instal·lació elèctrica s'ha de definir numèricament. És a dir, s'han de realitzar mesures en punts específics, cercar documents de l'empresa i consultar tècnics per estar en disposició de resoldre el sistema.

Calcular les variables elèctriques d'interès pot ser una operació llarga i complicada. *Matlab* és un software amb una gran potència de càlcul i amb representació gràfica que permet simular el conjunt del sistema de forma ràpida i visual. Així doncs, es crea un programa que sigui executable amb *Matlab* per analitzar l'estat actual del sistema i posteriorment simular l'impacte que hi tenen les solucions proposades.

Finalment, a partir dels resultats obtinguts, es determina una solució concreta i s'avalua econòmicament i ambientalment. Addicionalment, s'indica com extrapolar el programa a altres punts de la planta industrial.

Sumari

SUMARI	3
1. PREFACI	9
1.1. Origen del projecte	9
1.2. Motivació	9
2. INTRODUCCIÓ	11
2.1. Objectius del projecte.....	11
2.2. Abast del projecte	12
3. HARMÒNICS	13
3.1. Origen: càrrega no lineal.....	13
3.1.1. Variadors de freqüència.....	14
3.2. Caracterització	15
3.2.1. Taxa de distorsió harmònica (<i>THD</i>).....	15
3.2.2. Taxa de distorsió individual (<i>HD</i>).....	16
3.3. Efectes	16
3.3.1. Conductors	16
3.3.2. Transformadors	17
3.3.3. Condensadors	18
3.3.4. Motors.....	19
3.4. Mitigació	19
3.4.1. Filtrat d'harmònics.....	20
3.4.2. Desplaçament de la freqüència de ressonància.....	21
4. DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ	22
4.1. Instal·lació	22
4.1.1. Cogeneració	23
4.1.2. Transformadors	23
4.1.3. Equips de baixa tensió: Circuit derivat del transformador 1.....	23
4.2. Dades	25
4.2.1. Paràmetres de la instal·lació.....	25
4.2.1.1. Potència de curtcircuit de la xarxa	25
4.2.1.2. Transformador 1	26
4.2.1.3. Conductors.....	26
4.2.1.4. Potència dels variadors de freqüència	27

4.2.1.5. Bateria de condensadors	27
4.2.2. Variables elèctriques.....	27
4.2.2.1. Procediment.....	27
4.2.2.2. Adquisició de les dades i equips de mesura	28
4.2.2.3. Valors de les variables elèctriques.....	30
5. MODELITZACIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ	32
5.1. Plantejament del model	32
5.2. Definició numèrica del model.....	32
5.2.1. Caracterització de la xarxa	32
5.2.2. Caracterització del transformador.....	34
5.2.3. Caracterització dels conductors	35
5.2.4. Caracterització de les càrregues	36
5.2.5. Caracterització de la bateria de condensadors.....	40
5.3. Esquema circuit equivalent	41
5.4. Comprovacions prèvies.....	41
5.4.1. Caiguda de tensió a la línia.....	42
5.4.2. Bondat de l'aproximació de la càrrega no lineal	43
5.4.3. Interruptors automàtics	45
5.5. Punt de funcionament del transformador	45
5.6. Impacte en el transformador	46
5.7. Estimació de la ressonància	47
6. SIMULACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS	51
6.1. Formulació del mètode dels nusos	51
6.1.1. Nodes del sistema	51
6.1.2. Matriu d'admitàncies	52
6.1.3. Vector d'intensitats.....	52
6.1.4. Resolució	52
6.2. Estructura i notació del programa	53
6.3. Resposta freqüencial	55
6.4. Penetració harmònica	56
6.4.1. Resultats.....	56
6.4.2. Validació de les resultats	57
7. VALORACIÓ DE SOLUCIONS	60
7.1. Possibilitats del mercat	60
7.2. Efectes sobre el sistema	61
7.2.1. Filtre passiu.....	62

7.2.2. Inductància de filtrat.....	66
7.2.3. Especificació del filtre actiu.....	67
7.3. Proposta de solució.....	68
7.4. Extrapolació a altres punts de la instal·lació.....	68
8. ANÀLISI ECONÒMIC I AMBIENTAL	71
8.1. Anàlisi econòmic	71
8.2. Anàlisi ambiental	72
CONCLUSIONS	73
AGRAÏMENTS	75
BIBLIOGRAFIA.....	76
Referències bibliogràfiques	76
Bibliografia complementària	76
ANNEX	78

1. Prefaci

La incorporació de sistemes de control electrònics per optimitzar la producció en plantes industrials és una pràctica cada vegada més habitual. No obstant, la presència d'elements semiconductors augmenta el número de càrregues no lineals de la instal·lació i pot provocar l'aparició d'anomalies elèctriques (harmònics) que afecten negativament a la qualitat elèctrica. Per aquest motiu, és fonamental realitzar un manteniment preventiu i actiu de la instal·lació per tal de no causar danys als elements elèctrics ni reduir el rendiment del sistema.

1.1. Origen del projecte

Aquest projecte neix a partir de la necessitat del departament elèctric de *Bunge Iberica* de garantir uns nivells d'harmònics que no comprometin el correcte funcionament de la instal·lació. En aquest context, el mateix departament em va encarregar un estudi per tal de diagnosticar la situació actual i proposar solucions concretes. També se'm va traslladar la voluntat de que el treball representés un pla d'actuació davant un problema cada vegada més habitual i en constant canvi. La realització d'aquest estudi s'ha desenvolupat en un format de TFG.

1.2. Motivació

La principal motivació és poder aplicar els coneixements adquirits durant els estudis de grau en un problema absolutament real en un entorn industrial. La motivació és la conseqüència del repte que representa un estudi d'aquestes característiques. Per altra banda, la confiança dipositada en la meua persona per part de l'empresa també resulta satisfactori.

Particularment, el camp d'estudi també és estimulante. Representa una ampliació dels coneixements d'electrotècnia i un salt qualitatiu tant en la comprensió com en l'aplicació dels mateixos. Com s'ha comentat anteriorment, es tracta d'un problema d'absoluta i rigorosa actualitat i amb una gran projecció en els propers anys. Garantir una bona qualitat elèctrica representa un dels grans reptes de l'enginyeria elèctrica en el proper segle i assolir coneixements d'aquesta matèria és molt interessant.

2. Introducció

L'estudi de la qualitat elèctrica en una instal·lació desenvolupa un paper fonamental en qualsevol projecte d'enginyeria elèctrica. Controlar els defectes elèctrics és essencial per minimitzar les pèrdues de potència i garantir un manteniment eficient dels equips.

L'expansió de l'electrònica de potència ha provocat un augment significatiu de les càrregues no lineals, tant en les instal·lacions industrials com en la generació d'energia sostenible. Les càrregues no lineals contaminen amb corrents harmòniques les instal·lacions elèctriques, distorsionant les tensions i causant un mal funcionament dels dispositius connectats.

No obstant, l'evolució de l'electrònica és el que permet processar i calcular grans nombres de dades de forma àgil i còmode. En aquest espai, la programació és una eina bàsica per simular sistemes complexos, càlculs estadístics o emmagatzemar dades.

La complementació d'aquests dos camps representa poder descriure sistemes elèctrics de qualsevol complexitat i naturalesa sense que la capacitat de càlcul sigui un problema. Té una aplicació directe tant en la fase de la detecció del problema com en la cerca de solucions. Es redueix el temps de detecció del problema, permet valorar gran nombre de possibilitats i finalment, seleccionar la solució més adequada segons els criteris establerts. Addicionalment, les eines estadístiques faciliten la interpretació i visualització dels resultats.

Tots els indicis apunten a que l'optimització de la qualitat elèctrica i la programació jugaran un paper protagonista en la indústria 4.0. Entenent la qualitat elèctrica com a una gestió més eficient dels recursos energètics i entenent la programació com al llenguatge fonamental per a la resolució de problemes de càlcul.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és realitzar un estudi harmònic en la planta de *crushing* de *Bunge Iberica* al port de Barcelona i desenvolupar un software informàtic que pugui simular la instal·lació de forma intuïtiva i còmode. A partir dels resultats obtinguts, estar en disposició de proposar una sèrie de mesures per reduir la presència harmònica i, en conseqüència, solucionar els problemes elèctrics observats (principalment relacionats amb la dissipació de

calor de dispositius elèctrics). Per altra banda, també es busca que tant la metodologia utilitzada com el model del software serveixin guia a l'empresa i siguin extrapolables a altres seccions de la planta.

2.2. Abast del projecte

Per qüestions de temps i recursos l'estudi d'harmònics es desenvolupa en un sector concret de la planta. Concretament en les seccions que deriven del transformador on s'han detectat més anomalies. Malgrat això, com s'ha vingut dient, es cerca que el seu estudi sigui extrapolable a altres parts de la instal·lació alimentades per altres transformadors. El projecte té per abast els següents punts:

- Descripció del funcionament d'una planta industrial de grans dimensions, dels equips i aparells elèctrics principals.
- Mesura de variables elèctriques mitjançant un analitzador d'ones i un programa SCADA. Aquestes mesures han de permetre realitzar els càlculs pertinents i modelitzar de forma correcta el circuit.
- A partir d'hipòtesis simplifícatives modelitzar el circuit real de la forma més versemblant possible.
- Programar el model plantejat de forma intuïtiva i extrapolable.
- Analitzar la resposta freqüencial de la instal·lació i valorar l'estat en el que es troba.
- Estudiar l'estat del transformador on s'ha detectat un escalfament excessiu.
- Mitjançant els resultats obtinguts i els catàlegs dels principals fabricants proposar mesures concretes sobre la instal·lació.
- Realitzar un estudi econòmic i ambiental de l'actuació.

3. Harmònics

L'objectiu d'aquest capítol és exposar els conceptes teòrics sobre harmònics que s'utilitzen en el desenvolupament del projecte. Representa l'explicació del fenomen físic que hi ha darrere el problema i per tant, la seva comprensió és essencial per entendre el desenvolupament del mateix.

3.1. Origen: càrrega no lineal

Les càrregues no lineals són aquells elements que deformen la forma sinusoidal de la senyal. Aquest efecte és produït, entre altres factors, per la presència de components actius (díodes, transistors etc) que al ser semiconductors modifiquen la forma de la ona tant en tensió com en corrent. En la indústria, aquests elements són presents de forma molt habitual en dispositius electrònics de control. En la **Fig 3.1** es mostra com diferents circuits electrònics distorsionen les senyals elèctriques de tensió i corrent i dispositius atenuadors.

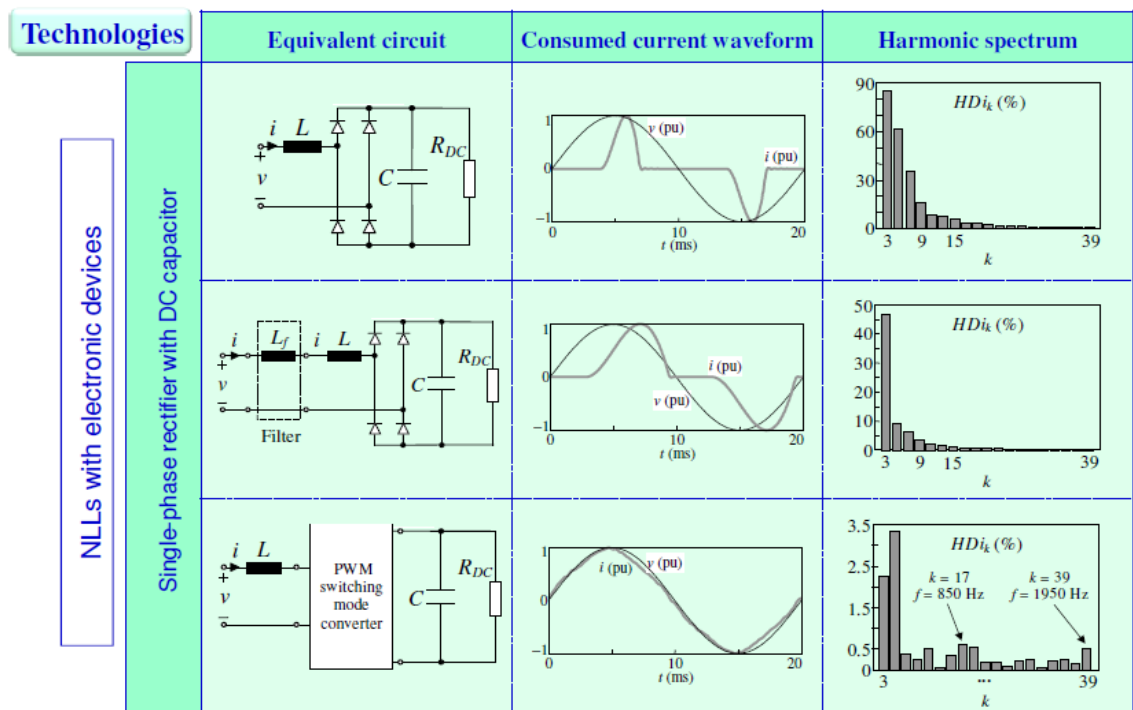


Fig. 3.1. – Efecte de diversos circuits electrònics en la forma d'ona i l'espectre harmònic [1]

Particularment, en la planta de *crushing* on s'elabora l'estudi la immensa majoria dels dispositius electrònics són variadors de freqüència i arrencadors progressius. Cal destacar que els arrencadors progressius només s'utilitzen en règim transitori per garantir l'arrencament controlat d'un motor. Per tant, no tenen interès en l'estudi que es realitza ja que tots els models aplicats només són vàlids en règim permanent.

3.1.1. Variadors de freqüència

Són dispositius electrònics que permeten variar la velocitat de motors asíncrons trifàsics. Converteixen les magnituds constants de freqüència i tensió a magnituds variables. Dominen el parell i la velocitat del motor, redueixen els cops mecànics i permeten executar moviments complexos i precisos.

L'esquema d'un variador de velocitat està format per un rectificador trifàsic capacitiu i un ondulador. Habitualment s'instal·len amb un filtre passiu i un interruptor automàtic de protecció en sèrie. [2]

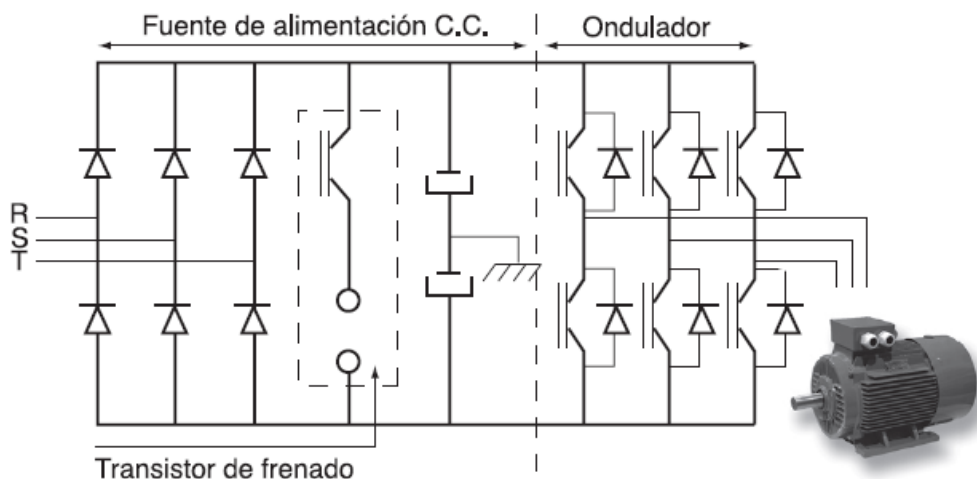


Fig. 3.2. – *Circuit equivalent d'un variador de freqüència* [2]

3.2. Caracterització

Les sèries de Fourier permeten descriure qualsevol funció periòdica a partir de la combinació de funcions sinusoidals simples. És el principi bàsic de l'estudi harmònic.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)] \quad (3.1)$$

Una propietat molt potent d'aquest desenvolupament és que el sumatori es realitza amb freqüències que son múltiples enters de la freqüència fonamental. Així doncs, qualsevol senyal periòdica es pot dividir en senyals de període múltiple enter del fonamental i d'una determinada amplitud.

3.2.1. Taxa de distorsió harmònica (*THD*)

Representa la quantificació numèrica d'harmònics en un punt determinat de la instal·lació. Concretament, és la distorsió harmònica respecte la component fonamental en tensió o corrent. Per tant, permet valorar amb facilitat la distorsió respecte la situació ideal on tot el senyal és provocat per la component fonamental. És la suma geomètrica de tots els harmònics individuals.

$$THD_x = 100 \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N x_k^2}}{x_1} \quad (3.2)$$

La TDH_I caracteritza el contingut harmònic en corrent consumida per les càrregues no lineals i que es distribueix per la instal·lació. En canvi, la TDH_U caracteritza el contingut harmònic de les tensions produït per la circulació de corrents amb un cert contingut harmònic (no sinusoidals) a través de les impedàncies del sistema. La taxa de distorsió harmònica és la principal variable per quantificar la qualitat elèctrica d'una instal·lació i el seu valor s'ha d'ajustar a la normativa vigent. (veure Annex 3)

3.2.2. Taxa de distorsió individual (HD)

Es defineix per estimar l'impacte que té l'harmònic d'una certa freqüència sobre el valor fonamental. Habitualment, la distorsió individual es representa amb un diagrama de barres anomenat espectre harmònic.

$$HDx_k = 100 \frac{x_k}{x_1} \quad (3.3)$$

Com es pot veure en la **Fig. 3.1** aquesta variable aporta informació sobre l'origen de la càrrega no lineal i també és de gran utilitat per determinar els efectes que apareixen sobre els components elèctrics.

3.3. Efectes

A continuació es descriu l'impacte dels harmònics sobre els elements presents en la planta on es realitza l'estudi.

3.3.1. Conductors

En una xarxa amb presència harmònica s'ha de considerar la contribució de les corrents harmòniques en la *Llei de Joule*:

$$P = RI_1^2 + R \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \quad (3.4)$$

Així doncs, els harmònics provoquen un augment significatiu de les pèrdues per calor ja que les corrents tenen un pes quadràtic.

Les corrents harmòniques de diferents freqüències tendeixen a circular per la perifèria del conductor reduint la secció útil del cable i provocant un augment de la resistència així com de les pèrdues per calor.

3.3.2. Transformadors

Un transformador és un aparell elèctric que trasllada potència elèctrica entre dos sistemes amb diferents nivells de tensions. Modifiquen el valor eficaç de l'ona sense alterar ni la freqüència ni la fase.

Com s'ha comentat en el darrer apartat, la presència harmònica provoca un augment no previst de la corrent que circula per un determinat punt. Així doncs, el transformador pot estar treballant per sobre del seu punt de treball nominal. Es redueix el temps de vida útil de l'aparell, augmenten les pèrdues en el nucli del transformador i apareixen problemes tèrmics i soroll. Cal mencionar que en el cas dels transformadors triangle-estrella els harmònics d'ordre múltiple a tres provoquen un escalfament addicional. [3]

Per mesurar el grau d'impacte dels harmònics en un transformador es calcula el *K-Factor*. Aquest valor representa la desviació harmònica present en el transformador respecte la situació ideal on el *K-Factor* seria unitari. Aquest valor es relaciona amb la capacitat (%) en la que treballa el transformador com s'aprecia en la **Fig 3.3**

$$K - Factor = \sum_{k=1}^{25} k^2 i_k^2 (pu) \quad (3.5)$$

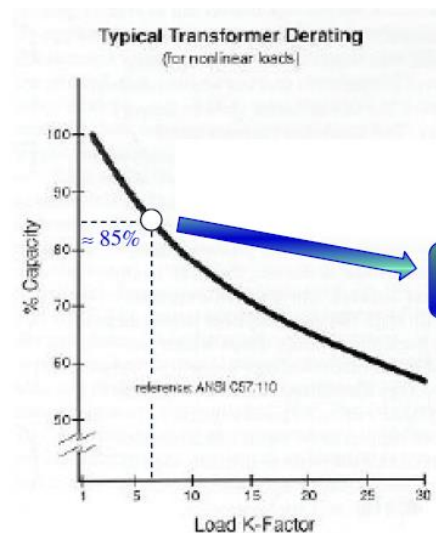


Fig. 3.3 – Gràfic relació Capacitat de treball (%) i K-Factor [1]

3.3.3. Condensadors

La presència d'un condensador en paral·lel amb una càrrega inductiva produeix un circuit ressonant. La ressonància consisteix en que per una determinada freqüència la impedància equivalent del circuit ressonant augmenta de forma brusca. És un fenomen que afecta al circuit equivalent i no té una incidència directa en els mateixos condensadors.

Per altra banda, els condensadors presenten una impedància de valor invers a la freqüència dels harmònics. Aquest fenomen combinat amb la presència harmònics de tensió provoca l'augment de les intensitats harmòniques que hi circulen. Per tant, els condensadors amplifiquen els harmònics i causen danys als equips de la instal·lació, especialment als mateixos condensadors.

$$\underline{Z}(f) = R + j \frac{X_L X_C}{X_L + X_C} = R + \frac{2\pi f L}{1 - (2\pi f)^2 LC} \quad (3.5)$$

La **Fig 3.4** representa gràficament l'equació (3.5). Si el denominador de la impedància del circuit ressonant s'anul·la per una freqüència determinada (f_0), el valor de la impedància tendeix a infinit.

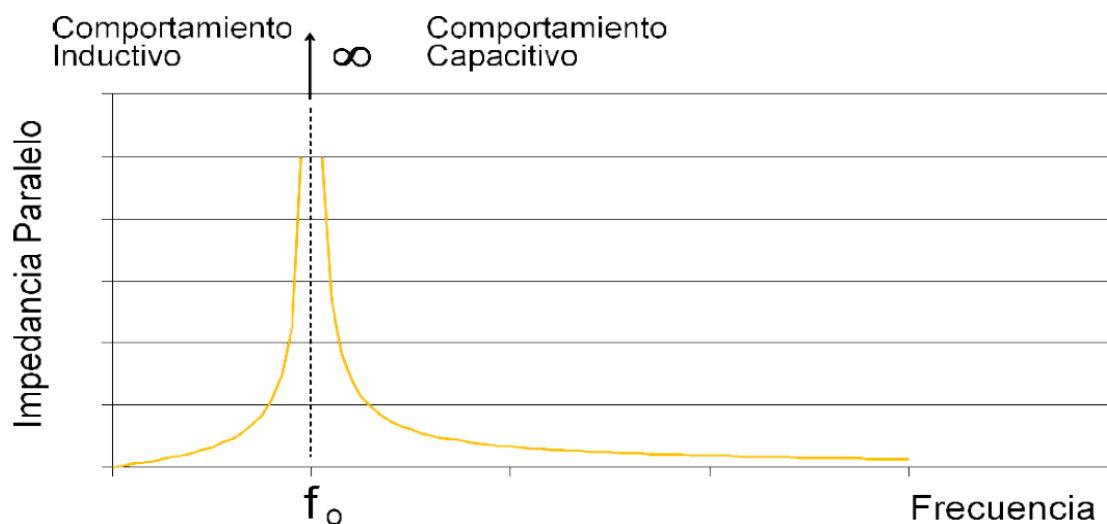


Fig 3.4 – Corba de ressonància. Impedància en funció de la freqüència [4]

S'observa que per a freqüències superiors a la de ressonància el circuit es comporta com un condensador, aportant energia a la xarxa. En canvi, per freqüències inferiors té un comportament inductiu.

3.3.4. Motors

Els harmònics també afecten de forma negativa als motors elèctrics. L'augment de la corrent que circula pel motor provoca més pèrdues per efecte Joule al coure i al ferro. Cada harmònic, al estar associat a una freqüència múltiple de la fonamental, provoquen l'aparició de parells paràsits que desgasten mecànicament el motor i redueixen considerablement la seva vida útil.

3.4. Mitigació

Les propostes sempre han de ser les suficients per resoldre el problema plantejat però mai han d'ésser sobredimensionades. S'han de complir les especificacions plantejades però no sobrepassar els marges de seguretat imposats ja que dispararia el cost de la solució.

A continuació es presenta una guia bàsica sobre efectes i solucions.

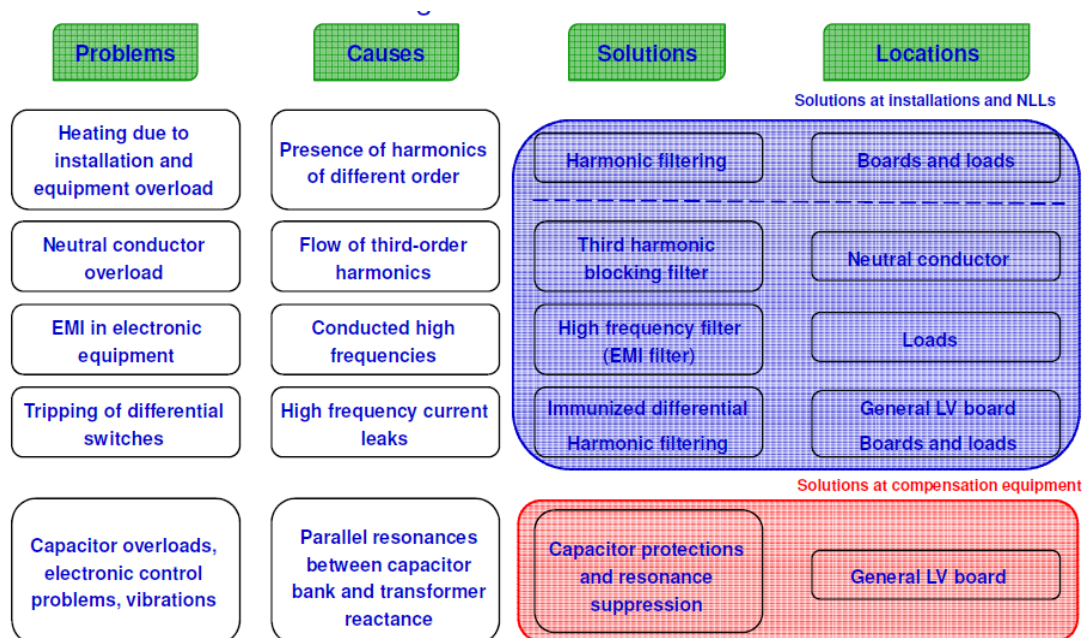


Fig. 3.5 – Relació entre problemes harmònics, causes, solucions i localització [1]

Es reflexa dos tipus d'actuacions segons la seva localització: sobre la càrrega no lineal filtrant harmònics i sobre els condensadors mitigant la ressonància. En els dos casos la solució passa per la creació d'un circuit L-C.

3.4.1. Filtrat d'harmònics

A continuació es presenten dos sistemes de reducció del contingut harmònic basades en idees completament diferents. Per una banda existeixen els filtres actius que actuen sobre l'origen del problema (càrrega no lineal) i per l'altre, els filtres passius que actuen sobre les seves conseqüències (tensions harmòniques).

- **Filtre passiu:** estan formats per una bobina i un condensador sintonitzats a la freqüència del harmònic que es vol filtrar. Imposen impedàncies molt petites a determinades freqüències per que les tensions harmòniques a aquestes freqüències siguin petites encara que segueixin existint corrents harmònics.

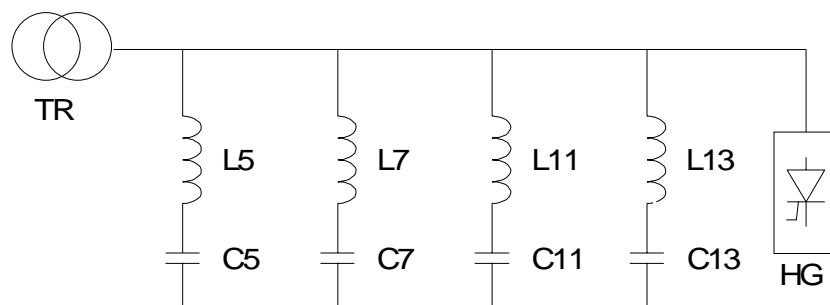


Fig 3.6 – Esquema elèctric de filtres passius sintonitzats a diferents freqüències en paral·lel amb una càrrega no lineal.

- **Filtre actiu:** és un aparell que injecta a la xarxa un ona tal que sumada a la forma d'ona distorsionada proporciona una sinusoidal perfecta a freqüència fonamental. Aquests filtres tenen uns sistemes de control sofisticats i s'adapten a possibles variacions de la càrrega. El seu gran inconvenient és el seu elevat cost i només es recomana en situacions completament imprescindibles.

3.4.2. Desplaçament de la freqüència de ressonància

En el cas particular de la ressonància només cal actuar si a la instal·lació apareixen harmònics de freqüència propera a la de ressonància. Hi ha dues formes d'actuar sobre un circuit ressonant: filtrant els harmònics com s'ha comentat prèviament o desplaçant la freqüència de ressonància.

El mètode més eficaç per desplaçar el punt de ressonància és connectant una reactància inductiva en sèrie calculant el seu valor (L) per una freqüència sintonitzada on no hi hagin harmònics elevats. Sempre s'han de sintonitzar els harmònics a una freqüència tant allunyada com sigui possible de la màxima harmònica. El gran inconvenient d'aquest sistema és que el cost d'un filtre a la freqüència de sintonització desitjada és molt elevat. Malgrat això, no sempre és necessari el filtre òptim per aconseguir una millora significativa de la ressonància. Existeix filtres sintonitzats a una freqüència de 190-215Hz que tenen un impacte molt positiu en la instal·lació i el seu preu és assumible.

Amb la presència de la inductància en sèrie s'obtenen dos efectes positius sobre la instal·lació:

- Es desplaça la freqüència de ressonància a una freqüència on la presència dels harmònics es mínima.
- Per a una freqüència propera a la de ressonància s'obté un comportament inductiu del sistema de forma que la impedància es proporcional a k .

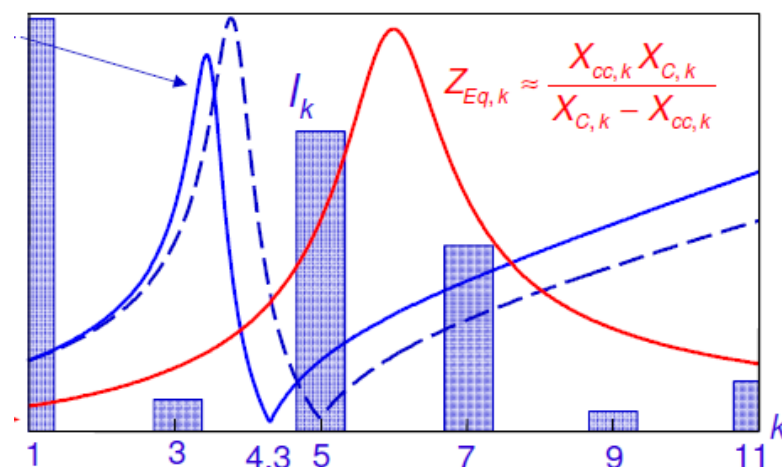


Fig 3.7 - Corba de ressonància original (vermell) i corba de ressonància desplaçada (blau). [1]

4. Descripció de la instal·lació

L'activitat que realitza *Bunge Iberica* al Port de Barcelona és la de trituració de llavors de soja (*soy crushing*) per a la creació de farina per la indústria ramadera i oli per al processat d'aliments. Cada etapa del procés de fabricació es porta a terme en una secció de la planta, distribuïdes en una extensió de 27.000 m². Addicionalment, existeixen oficines tècniques, sales de reunions i el laboratori de control de qualitat.

La potència instal·lada a la planta és de 5,5 MW i es disposa d'un sistema de generació de potència elèctrica per cogeneració de 10 MW que permet alimentar a la fàbrica i la vegada, subministrar l'excedent de potència a la xarxa.

La distribució de potència es porta a terme a partir de 5 transformadors que redueixen la tensió de 25kV a 400V i alimenten les diferents seccions de la planta. Per altra banda, la instal·lació també disposa d'un grup electrogen de 825 KVA per alimentar les seccions crítiques de la planta en cas que hi hagués un problema elèctric de la companyia distribuïdora o a cogeneració.

La descripció elèctrica de la instal·lació es realitza seguint una estructura d'arbre. És a dir, es comença en el punt de distribució de la companyia elèctrica i es va seguint aigües avall.

4.1. Instal·lació

Davant l'extensió i la complexitat del global de la instal·lació, aquesta es simplifica de forma esdevingui més visual, sigui més fàcil ubicar mesures i resultats. Només es mostra la informació que és estrictament necessària per l'anàlisi harmònic i en les seccions on s'hi estudia l'impacte. Cal mencionar que cada secció s'expressa a partir de la seva càrrega total, més endavant es modelitzen aquestes càrregues i s'explora amb més profunditat la seva naturalesa.

4.1.1. Cogeneració

Des de la subestació situada a Bellvitge (8,9 km) arriba una el cablejat unipolar de 3 fases d'alumini de 240 mm². Aquest cablejat entra a la sala de distribució d'alta tensió de cogeneració en la cabina de seccionador de la companyia. A l'entrada de cogeneració hi ha una potència aparent de 500 MVA i una tensió de 30 KV.

Existeixen tres generadors dièsel *Rolls Royce* de 3,3 MW que són els encarregats de produir una potència total de 10 MW. És necessari comentar que els generadors dièsel, al ser màquies elèctriques síncrones, generen energia elèctrica de qualitat i per tant, en el posterior estudi es pot assumir que les deficiències elèctriques no deriven de l'alimentació.

4.1.2. Transformadors

L'embarrat on estan connectats els primaris dels transformadors consta de tres fases de 25 kV, 50 Hz i amb una intensitat de curtcircuit de 6,5 kA. La connexió dels transformadors és triangle-estrella.

- **Transformador auxiliar:** Alimenta l'enllumenat i les oficines de la instal·lació reduint la tensió fins a 400V.
- **Transformadors 1,2,3 i 4:** Alimenten cada una de les seccions de la planta (veure annex 1)

4.1.3. Equips de baixa tensió: Circuit derivat del transformador 1

Els equips de baixa tensió es representen com la càrrega total que hi ha en cada secció. Aquesta càrrega és produïda pràcticament només per motors elèctrics. La tensió de línia dels equips és de 400 V. Particularment, l'estudi se centra en les càrregues que es situen en el secundari del transformador 1.

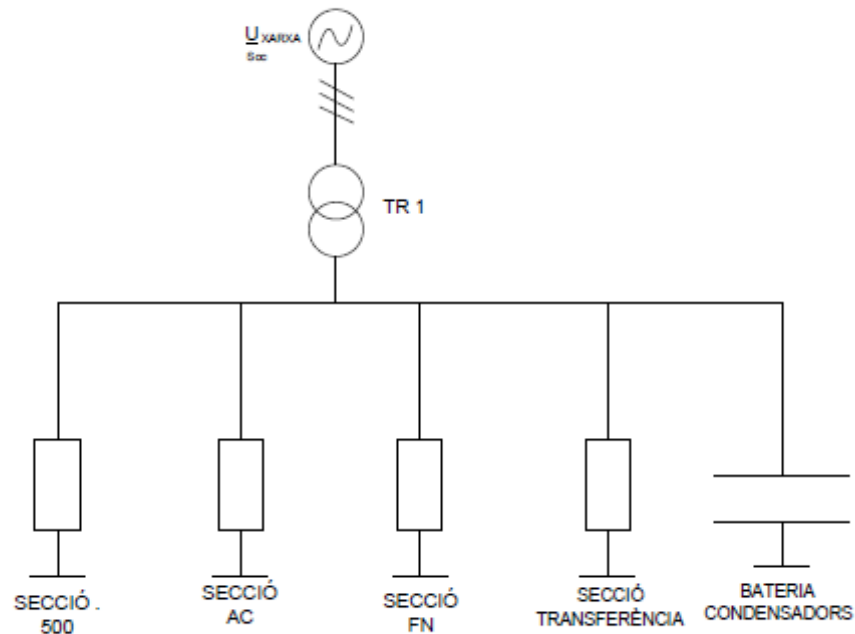


Fig 4.1 – Esquema derivat del transformador 1

Secció 500

És la part on es realitza l'extracció de l'oli del gra de soja mitjançant hexà a pressió. És de les seccions que més potència requereix a causa del gran nombre de motors. També destaca per la gran quantitat de variadors de freqüència presents. Concretament, existeix un variador de 132 kW de especial transcendència. Els conductors de la secció són de 4 cables d'alumini per fase de 240 mm^2 de secció i tenen una longitud de 65 m.

Força normal (FN)

Motors de càrrega lineal. No hi ha variadors de freqüència. Els conductors tenen un cable de coure per fase de 300 mm^2 i tenen una longitud de 6 m

Aire comprimit (AC)

Motors de càrrega lineal. No hi ha variadors de freqüència. La secció s'alimenta a través d'un cable d'alumini per fase de 400 mm^2 i 25 m de longitud.

Transferència (TRANS)

Secció formada per diverses seccions: torre de refrigeració (2300), quadre contra incendis (2400), magatzem, taller i sales auxiliars. Així doncs, existeix tant càrrega lineal com no lineal. Els conductors de la secció són 4 cables per fase de 240 mm² d'alumini en un recorregut de 60 m.

Condensadors

Bateria de condensadors de 400 kVAr. La distància entre el transformador i la bateria de condensadors és negligible.

4.2. Dades

Es presenten les dades necessàries per la realització de l'estudi. Es pretén definir el seu origen i el procediment d'obtenció de tal manera que siguin fàcils d'interpretar.

Les dades de l'estudi es poden classificar en dos grups: paràmetres de la instal·lació i variables elèctriques.

Els paràmetres representen magnituds pròpies de la instal·lació, són valors fixes i s'obtenen a partir de documents interns de l'empresa o a partir de l'experiència dels operaris.

En canvi, les variables elèctriques són valors mutables i es registren amb instruments de mesura en un punt determinat de la instal·lació. És necessari definir el criteri que s'ha seguit per escollir els punts de mesura i els resultats que s'han obtingut.

4.2.1. Paràmetres de la instal·lació

A continuació es presenten els paràmetres de la instal·lació que són necessaris per l'estudi, quins valors numèrics tenen associats i com s'han obtingut.

4.2.1.1. Potència de curtcircuit de la xarxa

Representa la potència inicial de curtcircuit de la xarxa. En el diagrama unifilar (veure annex 2) s'observa que per sobre de l'estació de cogeneració la potència de la xarxa és de 500 MVA, per tant aquesta és la potència de curtcircuit de la xarxa.

4.2.1.2. Transformador 1

Totes les dades del transformador deriven de la informació present en la seva placa de característiques. (Veure Annex 1)

4.2.1.3. Conductors

Els paràmetres dels conductors són essencials per veure l'afecte que tenen els cables sobre el sistema. Els cables es modelitzen amb de la de la seva impedància equivalent i pel seu càlcul es requereix de les següents especificacions per a cada càrrega: secció del cable, longitud, resistivitat i número de cables per fase.

La secció, el material i el nombre de cables per fase són dades presents en *el diagrama unifilar de la planta* (veure Annex 2) . A partir del material, conèixer la seva resistivitat es immediat si es disposa del catàleg adequat [2]

La longitud es un paràmetre que s'ha de consultar al supervisor elèctric de la planta ja que no es disposa de cap document que ho especifiqui. Aquesta dada també es podria extreure del plànol de la planta (veure Annex 2)

Els valors dels paràmetres relatius una conductors es representa en la següent taula.

	$S \text{ (mm}^2\text{)}$	$Long \text{ (m)}$	$\rho \text{ (m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m) [2]}$	$Num \text{ (per fase)}$
Secció 500	240	65	36	4
Secció FN	300	6	22,5	1
Secció AC	400	25	36	1
Transferència	240	65	36	4

Taula 4.1 – Secció, longitud, resistivitat i nombre de cables per fase de cada secció.

4.2.1.4. Potència dels variadors de freqüència

Com s'ha comentat en el capítol d'harmònics, la principal font de càrrega no lineal són els variadors de freqüència instal·lats en sèrie amb certs motors. Definir aquest paràmetre és absolutament essencial per aproximar el grau de càrrega no lineal de la instal·lació.

L'empresa disposa d'un document *excel* on s'especifica detalladament cada variador de freqüència i la seva ubicació a la planta. Aquest document és necessari per realitzar un manteniment elèctric eficient. Per calcular la potència activa total per cada secció només cal sumar la potència activa de cada variador de freqüència.

	Potència activa variadors de freqüència (kW)
Secció 500	349,5
Secció FN	0
Secció AC	0
Secció Transferència	66

Taula 4.2 – Potència instal·lada en variadors de freqüència per a cada secció.

4.2.1.5. Bateria de condensadors

La potència reactiva de 400 kVAr de la bateria de condensadors s'extreu de la placa de característiques.

4.2.2. Variables elèctriques

4.2.2.1. Procediment

S'ha de considerar que la fàbrica no treballa sempre en el mateix punt de treball, hi ha diversos punts de funcionament d'acord amb la producció requerida. És evident que les variables elèctriques es veuran afectades d'acord amb la càrrega que estigui sotmesa la instal·lació. D'aquesta situació en deriven dues observacions. La primera és que les mesures puntuals només aporten informació sobre un punt de treball concret. En canvi, en aquest estudi interessa veure el comportament general de la instal·lació. Realitzar mesures en un període de temps suficientment gran aporta més informació. La segona és que per assolir el màxim realisme, totes les mesures s'haurien de realitzar simultàniament. D'aquesta manera es veuria la interacció real entre tots els punts de mesura del circuit.

Aquesta situació, per limitacions de recursos no és possible i per tant, les mesures s'han de realitzar de forma consecutiva.

La primera mesura es realitza en el punt on s'ha detectat el problema: el secundari del transformador. A partir d'aquí, la metodologia consisteix en mesurar aigües avall, seguint el diagrama unifilar i així obtenir valors de les altres seccions. D'aquesta manera es pot filtrar i trobar l'origen dels harmònics així com analitzar les seves conseqüències.

4.2.2.2. Adquisició de les dades i equips de mesura

Analitzador de xarxa: *Fluke 430-II*

Les mesures amb l'analitzador de xarxa es realitzen en períodes de 24 hores per obtenir el cicle de treball durant un dia complet. Per el tractament i l'anàlisi de les dades aquest aparell té una un software informàtic associat: *PowerLog 430-II V5.6*. Permet veure l'evolució temporal de múltiples variables elèctriques i disposa d'una gran quantitat d'eines estadístiques. Cal destacar que una gran limitació d'aquest aparell és que no permet veure la fase de les corrents i tensions harmòniques.[5]

En aquest estudi s'empra l'analitzador d'ones per mesurar:

- Mòdul del corrent fonamental (I_1) i harmòniques (I_3 , I_5 , I_7 , I_9).
- Mòdul de la tensió fonamental (U_1) i harmòniques (U_3 , U_5 , U_7 , U_9).



Fig. 4.2. – *Fluke 430-II* [5]

SCADA: *Supervisory Control And Data Acquisition*

L'empresa disposa d'un sistema de supervisió i control de dades que permet obtenir dades de paràmetres elèctrics en un gran nombre de punts de la planta. Aquesta eina és molt potent per la seva facilitat d'ús i per poder veure en simultàniament què es produeix en diversos sectors de la fàbrica.

S'obtenen dades de :

- Potència activa i reactiva fonamental total de cada secció ($P_N + jQ_N$).
- Tensió de línia (U_L)

Considerant que la càrrega és simètrica amb aquestes dades es pot calcular fàcilment la intensitat fonamental total que circula per cada fase de la càrrega.

Oscil·loscopi

Aquest instrument té per objectiu visualitzar senyals elèctriques. És a dir, veure la forma d'ona de tensió i corrent. Aquesta acció també és possible amb l'analitzador d'ones però per qüestions de disponibilitat s'utilitza l'oscil·loscopi.

En la forma d'ona ja s'indueix que els variadors de freqüència són els responsables de la càrrega no lineal, d'acord amb la **Fig 3.1**.

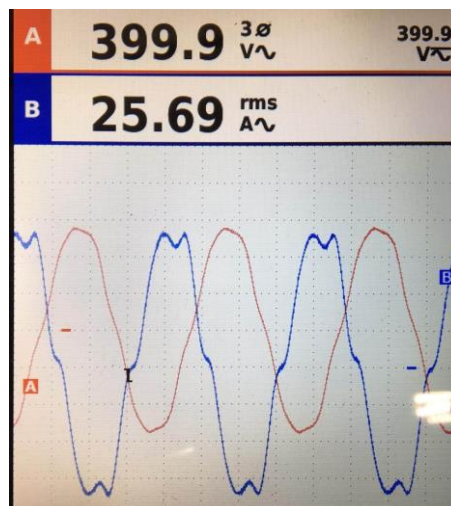


Fig. 4.3 - Forma d'ona en tensió (vermell) i corrent (blau) en secundari del transformador 1

4.2.2.3. Valors de les variables elèctriques

A continuació, s'exposen les variables mesurades amb els diferents aparells per cada secció. Aquesta valors esdevenen les dades per realitzar els càlculs elèctrics per a cada secció.

	$P+jQ$ (kVA)
Secció 500	765 + j343,5
Secció FN	205 + j0
Secció AC	194 + j128
Secció Transferència	325,1 + j227,2

Taula 4.3 – Càrrega fonamental lineal i no lineal per a cada secció

	TDH_U (%)	TDH_I (%)
Secció 500	5,25	20,03
Secció Transferència	5,43	10,26

Taula 4.4 – Taxa de distorsió harmònica total en tensió i corrent per a les seccions amb càrrega no lineal

Secció 500				
K	I_k (A)	HD_I (%)	U_K (fase-neutre) (V)	HD_U (%)
1	1156	100	230,02	100
3	23,45	2,23	0,48	0,21
5	231,85	20,06	10,63	4,62
7	48,45	4,19	5,61	2,44
9	9,5	0,82	0,46	0,2

Taula 4.5 – Taxa de distorsió harmònica individual en tensió i corrent i els respectius valors absoluts en la secció 500

Secció Transferència				
K	I_k (A)	HD_I (%)	U_K (fase-neutre) (V)	HD_U (%)
1	585	100	231,38	100
3	34,63	5,92	0,64	0,28
5	55,57	9,50	11,17	4,83
7	24,16	4,13	5,57	2,41
9	13,46	2,3	0,48	0,18

Taula 4.6 – Taxa de distorsió harmònica individual en tensió i corrent i els respectius valors absoluts en la secció transferència

S'observa que els valors de les distorsions harmòniques totals són superiors al 5 % i per tant, els harmònics poden causar problemes en la instal·lació [1].

És necessari analitzar la instal·lació amb més profunditat per detectar l'origen de l'elevada taxa de distorsió harmònica, fer un diagnòstic específic i proposar solucions. Per analitzar el problema de forma completa, es procedeix a estudiar la modelització de la instal·lació per posteriorment realitzar un programa que simuli el circuit equivalent determinat. La modelització també permet simplificar el circuit equivalent per fer càlculs ràpids i senzills per orientar el problema i validar la coherència entre la simulació i els resultats aproximats. Tot això es presenta a continuació.

5. Modelització de la instal·lació

5.1. Plantejament del model

Per poder analitzar un circuit complex s'han d'assumir unes hipòtesis que ens permetin traslladar la realitat en un model que es pugui estudiar. És a dir, s'ha de trobar una simplificació de la realitat a partir un model matemàtic que s'hi ajusti. Aquest és l'objectiu de la modelització: representar el circuit real de forma que sigui possible fer un anàlisi harmònic amb un software informàtic.

El circuit que es vol modelitzar és tot l'esquema que deriva del transformador número 1 (**Fig 4.1**) Així doncs, els elements que s'han de caracteritzar són: xarxa d'alimentació, transformador, conductors, càrregues lineals i càrregues no lineals.

5.2. Definició numèrica del model

Es planteja el model en el domini freqüencial, per tant sempre s'haurà de considerar en quina freqüència ens trobem.

5.2.1. Caracterització de la xarxa

A partir de la tensió de línia del secundari del transformador i de la potència de curtcircuit de la xarxa es calcula l'equivalent de *Thévenin* de la xarxa. [7]

Per a la freqüència fonamental:

- Tensió en buit fase-neutre: $U_{0,1} = \frac{400}{\sqrt{3}} \text{ V}$ (5.1)

- Impedància de curtcircuit: $X_{CC,1}^R = \frac{U_L^2}{S_{CC}} = \frac{400^2}{500 \cdot 10^6} = 0,32 \text{ m}\Omega$ (5.2)

Per a freqüències múltiples de la fonamental:

- Tensió en buit fase-neutre: $U_{0,k} = 0 \text{ V}$ (5.3)

- Impedància de curtcircuit: $X_{CC,k}^R = k \cdot X_{CC,1}^R$ (5.4)

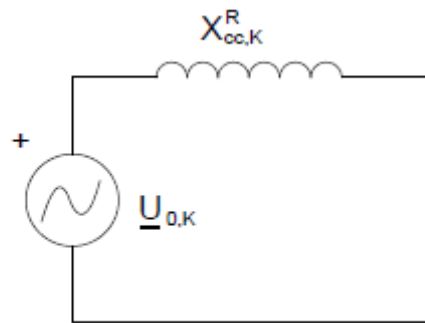


Fig. 5.1 – Circuit equivalent de Thévenin de la xarxa

Calcular l'equivalent de Norton és immediat. La impedància de curtcircuit és idèntica a la calculada a partir de l'equivalent de Thévenin. Només cal definir les fonts de corrent:

Per a freqüència fonamental: $I_g = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot jX_{CC,1}^R} = j 721,69 \text{ kA}$ (5.4)

Per a freqüències múltiples de la fonamental: $I_g = 0 \text{ A}$ (5.5)

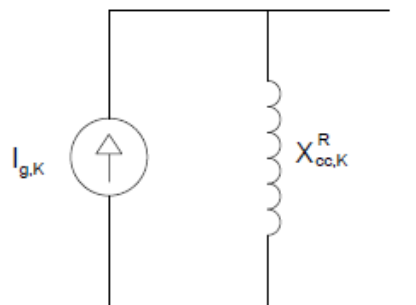


Fig. 5.2 – Circuit equivalent de Norton de la xarxa

5.2.2. Caracterització del transformador

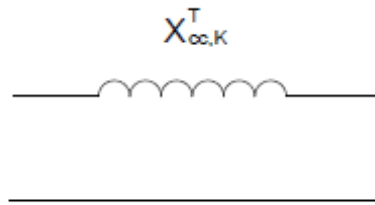


Fig. 5.3 – *Circuit equivalent del transformador*

Es modela a través del circuit més simple possible considerant una inductància de curtcircuit. La impedància en el secundari del transformador representarà el transformador real. Aquesta impedància depèn de forma proporcional a l'ordre harmònic.

La placa de característiques del transformador proporciona la informació necessària per modelitzar-lo (veure Annex 1).

- Reactància equivalent per a freqüència fonamental vista des del secundari:

$$X_{CC,1}^{TR1} = \frac{U_{CC} U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{8,42 \cdot 400^2}{100 \cdot 2500 \cdot 10^3} = 5,39 \text{ m}\Omega \quad (5.5)$$

- Reactància equivalent per a freqüències harmòniques:

$$X_{CC,k}^{TR1} (\text{m}\Omega) = k X_{CC,1}^{TR1} = 5,39 k \quad (5.6)$$

5.2.3. Caracterització dels conductors

S'utilitza el model de pi paràmetres concentrats menyspreant els paràmetres transversals (condensadors). Així doncs, la impedància dels conductors es determina a partir de la suma complexa de la resistència i la reactància inductiva.

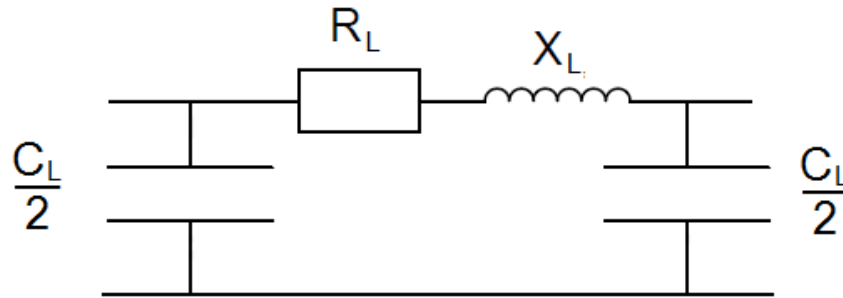


Fig. 5.4 – *Circuit equivalent dels conductors*

Es considera que la part resistiva no varia amb la freqüència:

$$R_{L,1}(\Omega) = R_{L,k} = \rho \frac{long}{S \cdot Num} \quad (5.7)$$

En canvi, la part inductiva depèn del ordre harmònic.

$$X_{L,k}(\Omega) = 0,08 \frac{dist}{N} k \quad (5.8)$$

Totes les dades necessàries per definir els conductors de cada secció es troben a la **Taula 4.1**

	$R_{L,1} \text{ (m}\Omega\text{)}$	$X_{L,1} \text{ (m}\Omega\text{)}$
Secció 500	0,75	0,4
Secció FN	0,45	0,48
Secció AC	2,25	0,4
Transferència	0,75	0,4

Taula 5.1 – Resistències i reactàncies a freqüència fonamental per a cada secció

5.2.4. Caracterització de les càrregues

Determinar la naturalesa de la càrrega és essencial per resoldre el problema de forma correcta. Com s'ha comentat en el capítol 2.1. existeixen dos tipus de càrrega: la càrrega lineal (CL) i la no lineal (CNL).

En primer lloc, es requereix determinar la potència activa i reactiva de tot el conjunt de CNL en un node. És a dir, quina contribució tenen les càrregues no lineals en el conjunt de la càrrega total formada per CL i CNL.

S'aproximen les potències no lineals a partir de la potència instal·lada en variadors de freqüència (**Taula 4.2**). Es considera que la potència activa no lineal és la potència activa governada per variadors de freqüència i que aquests no aporten potència reactiva. El càlcul de la càrrega lineal és la resta de la càrrega total (**Taula 4.3**) i les potències no lineals.

Càrrega no lineal:

$$P^{CNL} = P^{VF} \quad (5.9)$$

$$Q^{CNL} \approx 0 \quad (5.10)$$

Càrrega lineal:

$$P^{CL} = P^{TOTAL} - P^{CNL} \quad (5.11)$$

$$Q^{CL} = Q^{TOTAL} \quad (5.12)$$

	\underline{S}^{CNL} (kVA)	\underline{S}^{CL} (kVA)
Secció 500	349,5 + j0	415,5 + j324,5
Secció transformació	70 + j0	255,1 + j227,2

Taula 5.2 – Potència activa i reactiva no lineal/potència activa i reactiva lineal per a cada secció

Càrrega Lineal

Un cop definit el valor de les càrregues cal modelitzar-les. La càrrega lineal es representa amb la impedància equivalent de la càrrega lineal associada. [6]

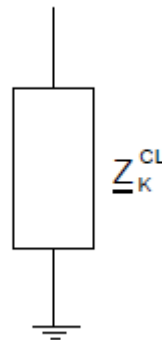


Fig. 5.5 – Circuit equivalent de la càrrega lineal

Per a freqüència fonamental el càlcul resulta evident:

$$\underline{Z}_1 = \frac{U_N^2}{(\underline{S}^{CL})^*} \quad (5.13)$$

Per a freqüències harmòniques, la impedància de la càrrega lineal és una reactància inductiva. El seu valor és el mòdul de la impedància fonamental multiplicada per l'ordre del harmònic i la relació entre la corrent en el punt de funcionament (I_{ST}) la corrent d'arrencament (I_{FL}). El valor d'aquesta última relació no és evident i s'utilitza un valor de

compromís que satisfà tant a motors a baixa tensió com de mitja tensió. [6]

$$\frac{I_{ST}}{I_{FL}} \approx 6 \quad (5.14)$$

$$\underline{Z}_k \approx jk \frac{I_{FL}}{I_{ST}} |\underline{Z}_1| \quad (5.15)$$

	$\underline{Z}_1 (\Omega)$	$\underline{Z}_3 (\Omega)$	$\underline{Z}_5 (\Omega)$	$\underline{Z}_7 (\Omega)$	$\underline{Z}_9 (\Omega)$
Secció 500	0,24+j0,19	j0,15	j0,25	j0,36	j0,46
Secció FN	0,78	j0,39	j0,65	j0,91	j1,17
Secció AC	0,57+j0,38	j0,34	j0,57	j0,8	j1,03
Secció Transferència	0,35+j0,31	j0,23	j0,39	j0,55	j0,7

Taula 5.3 – *Valors de les impedàncies equivalents a la càrrega lineal per a cada secció*

Caracterització de les càrregues no lineals

Les càrregues no lineals es defineixen com fonts de corrent de freqüència d'ordre k .

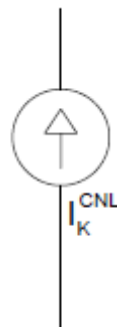


Fig. 5.6 – *Circuit equivalent de la càrrega no lineal*

Pel càlcul del valor de intensitat no lineal harmònica en cada secció s'utilitzen dues aproximacions:

- No considerar la fase de la corrent total.

$$I_k^{CNL+CL} \approx I_k^{CNL+CL} \quad (5.16)$$

- En cada secció, la impedància de la càrrega lineal per a freqüències harmòniques ($|Z_k|$) és suficientment gran i les tensions harmòniques (U_k) suficientment petites com per considerar que la corrent harmònica que circula per la càrrega lineal és menyspreable. És a dir, tota la intensitat harmònica circula per la font de corrent:

$$I_k^{CNL+CL} \approx I_k^{CNL} \quad (5.17)$$

Posteriorment, en el capítol 5.4.2 es valida la bondat d'aquestes aproximacions.

Particularment, per a la freqüència fonamental com que *a priori* sempre es coneix la tensió fonamental no és necessari aplicar la segona simplificació. Es pot calcular la intensitat no lineal (I_1^{CNL}) com la total (I_1^{CNL+CL}) menys la que circula per la impedància de la càrrega lineal (Z_1).

$$I_1^{CNL} \approx I_1^{CNL+CL} - \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_1} \quad (5.18)$$

$$I_1^{CNL,500} \approx 1185 - \frac{400}{\sqrt{3}Z_{1,500}} \quad (5.19)$$

$$I_1^{CNL,Transf} \approx 585 - \frac{400}{\sqrt{3}Z_{1,Transf}} \quad (5.20)$$

	I_1^{CNL} (A)	I_3^{CNL} (A)	I_5^{CNL} (A)	I_7^{CNL} (A)	I_9^{CNL} (A)
Secció 500	415,2	23,45	231,85	48,45	9,5
Transferència	91,06	34,63	55,57	24,16	13,46

Taula 5.4 – Primera aproximació dels valors de les fonts de corrent equivalents a la càrrega no lineal per a cada secció

5.2.5. Caracterització de la bateria de condensadors

Per a freqüència fonamental:

$$X_{c,1} = \frac{U_{N2}^2}{|Q_c|} = \frac{400^2}{400.000} = 0,4\Omega \quad (5.21)$$

Per a freqüències harmòniques:

$$X_{c,k} = \frac{X_{c,1}}{k} \quad (5.22)$$

$X_{C,1}$ (Ω)	$X_{C,3}$ (Ω)	$X_{C,5}$ (Ω)	$X_{C,7}$ (Ω)	$X_{C,9}$ (Ω)
0,4	0,13	0,08	0,06	0,04

Taula 5.5 – Valors de la reactància equivalent a la bateria de condensadors per a cada freqüència.

5.3. Esquema circuit equivalent

El circuit resultant de la modelització queda definit de la següent manera:

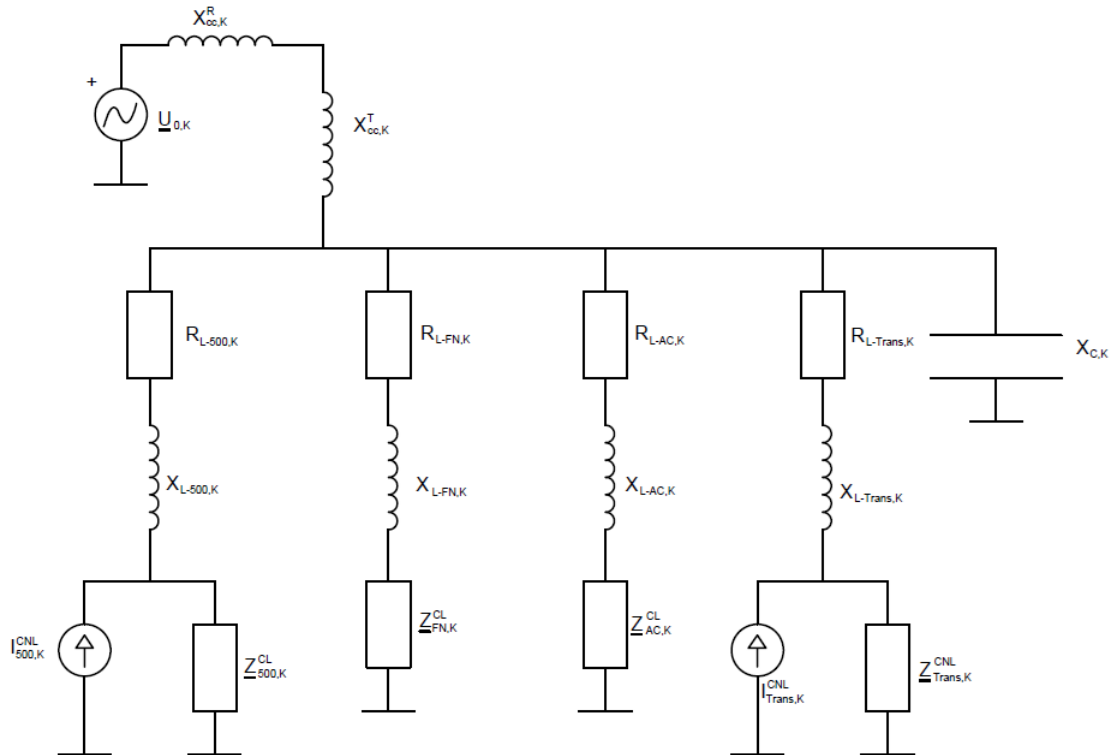


Fig. 5.7 – Circuit equivalent de la instal·lació

5.4. Comprovacions prèvies

Per comprovar que els resultats de les aproximacions i les mesures són raonables es realitzen les següents comprovacions.

- La caiguda de tensió de la línia considerant la intensitat total que hi circula. El valor de la caiguda de tensió no pot superar el 5% (Veure Annex 3).
- Càlcul directe de la intensitat de la càrrega no lineal.
- Es valida que la intensitat total mesurada no es superior a la de tall dels interruptors automàtics.

- Es comprova que el transformador treballa per sota del seu punt de funcionament nominal.

5.4.1. Caiguda de tensió a la línia

Es calculen les intensitats totals (lineal i no lineal) que circulen per les línies de cada secció. Aquests valors s'obtenen a partir de la suma de mòduls de totes les intensitats registrades per les seccions on hi ha càrrega no lineal. Per les seccions on només hi ha càrrega lineal es calcula amb les potències mesurades.

$$I_{Total} = \sqrt{(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2)} \quad (5.23)$$

$$I_{TOT} = \frac{S^*}{3 \frac{400}{\sqrt{3}}} \quad (5.24)$$

	$I_{TOT} (A)$
Secció 500	1211,57
Secció FN	296,07
Secció AC	335,77
Secció Transferència	589,3
Condensadors	577,35

Taula 5.6 – Valor absolut de la intensitat que circula per cada secció

Càlcul de la caiguda de tensió percentual

$$\Delta U(\%) = 100 \frac{\sqrt{3} |(R_L + jX_L) \cdot \underline{I}|}{U_N} \quad (5.25)$$

	$\Delta U (\%)$
Secció 500	0,445
Secció FN	0,084
Secció AC	0,33
Secció Transferència	0,21

Taula 5.7 – *Caiguda de tensió percentual en la conducció de cada secció*

El disseny i el punt de treball de la línia s'ajusta a la normativa vigent ja que la caiguda de tensió en els conductors no supera el 5% en cap secció.

5.4.2. Bondat de l'aproximació de la càrrega no lineal

En aquest apartat es comprova el realisme de les aproximacions realitzades per assignar valor numèric a les fonts de corrent no lineals. Si les aproximacions són raonables es poden extrapolar a altres punts de la instal·lació. La gran virtut de la simplificació que s'ha realitzat és que no es necessiten les tensions harmòniques (U_3, U_5, U_7, U_9) pel càlcul de les intensitats harmòniques no lineals.

Primerament, pel càlcul de les intensitats lineals de forma directa s'aprofita que s'han mesurat les tensions harmòniques. Aquest valor hauria de ser el més petit possible per complir amb la hipòtesis plantejada.

$$I_k^{CL} = \frac{U_k}{Z_k} \quad (5.26)$$

Posteriorment, es resta el valor obtingut (I_k^{CL}) a la intensitat harmònica total (I_k^{CL+CNL}) per obtenir la intensitat de la circula per la càrrega no lineal.

$$I_k^{CNL} \approx I_k^{CNL+CL} - I_k^{CL} \quad (5.27)$$

Finalment, es compara el valor I_k^{CNL} (s'acaba de calcular) amb I_k^{CNL+CL} (s'ha utilitzat per aproximar) i es calcula l'error relatiu que hi ha en la hipòtesis d'assumir que són iguals.

Secció 500					
k	$U_k(V)$	$Z_k(\Omega)$	$I_k^{CL} (A)$	$I_k^{CNL} \approx I_k^{CNL+CL} - I_k^{CL} (A)$	Error relatiu
3	0,48	0,15	3,2	20,62	13,43 %
5	10,63	0,25	42,53	189,32	18,34 %
7	5,61	0,36	15,58	35,38	32,15 %
9	0,46	0,46	1	21,87	10,52 %

Taula 5.8 – Error percentual entre la intensitat no lineal mesurada empíricament i la intensitat no lineal obtinguda amb simplificacions a la secció 500

Secció Transferència					
k	$U_k(V)$	$Z_k(\Omega)$	$I_k^{CL} (A)$	$I_k^{CNL} \approx I_k^{CNL+CL} - I_k^{CL} (A)$	Error relatiu
3	0,64	0,23	2,78	31,85	8,03%
5	11,17	0,39	32,1	23,47	57,76%
7	5,57	0,55	10,12	14,04	41,88%
9	0,48	0,7	0,68	12,78	5,05%

Taula 5.9 - Error percentual entre la intensitat no lineal mesurada empíricament i la intensitat no lineal obtinguda amb simplificacions a la secció transferència.

Els valors de les intensitats que circulen per la càrrega lineal són majors al que s'esperava. Aquest fet afecta de forma directa al càlcul dels valors de les fonts de corrent com ja s'ha comentat. Davant dels errors relatius obtinguts, no es pot considerar la segona simplificació si volen obtenir valors precisos. Així doncs, per la simulació del circuit equivalent no s'assumeix la segona simplificació i els valors de les fonts de tensió són els de la intensitat no lineal calculats en la **Taula 5.8** i **Taula 5.9** que s'exposen de forma compacta en la següent taula.

	$I_1^{CL} (A)$	$I_3^{CL} (A)$	$I_5^{CL} (A)$	$I_7^{CL} (A)$	$I_9^{CL} (A)$
Secció 500	415,2	23,82	231,85	48,45	9,5
Transferència	91,06	34,63	55,57	24,16	13,46

Taula 5.10 – Valors definitius de les fonts de corrent equivalents a la càrrega no lineal per a cada secció

5.4.3. Interruptors automàtics

Comparativa amb la intensitat màxima dels interruptors automàtics de cada branca.

$$\text{- Secció 500: } I_{500} = 1211,57 A < I_{autom} = 2500 A \quad (5.28)$$

$$\text{- Secció FN: } I_{FN} = 296,06 A < I_{autom} = 1000 A \quad (5.29)$$

$$\text{- Secció AC: } I_{AC} = 335,77 A < I_{autom} = 1000 A \quad (5.30)$$

$$\text{- Secció Transferència: } I_{TRANSF} = 589,48 A < I_{autom} = 2500 A \quad (5.31)$$

$$\text{Interruptor automàtic general: } \underline{I}_{TOT} = 2149,5 - j431,13 \quad (5.32)$$

$$I_{TOT} = 2192,31 < 4000 \quad (5.33)$$

Les intensitats totals es situen lluny de la intensitat de tall dels interruptors automàtics. Es descarta un tall de corrent no desitjat provocat pels disjuntors.

5.5. Punt de funcionament del transformador

L'escalfament excessiu del transformador ha sigut un dels problemes que s'han detectat inicialment.

Es calcula la intensitat en el punt de funcionament nominal del transformador.

$$I_N^{TR1} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{2.500.000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 3608,4 \quad (5.34)$$

La corrent fonamental que circula pel transformador se situa molt per sota de la corrent. En el següent capítol es comprova si les corrents harmòniques provoquen que se superi la nominal però a simple vista ja s'aprecia que això no passarà.

$$2192,31 A < 3608,4 A \quad (5.35)$$

$$I_{TOT} < I_N^{TR1} \quad (5.36)$$

5.6. Impacte en el transformador

Per valorar l'impacte que tenen els harmònics en un transformador s'empra un paràmetre anomenat *factor K*. El *factor K* és un ponderació dels corrents de càrrega harmònics segons els seus efectes en el transformador. L'ordre del harmònic, al provocar un gran impacte té un pes quadràtic. Les intensitats al estar reduïdes a la base de *pu* permeten obtenir un valor numèric fàcil d'interpretar. Així doncs, un *factor K* de 1 indica una càrrega lineal sense harmònics i a mesura que aquest va augmentant major la penetració harmònica.

$$K = \sum_{k=1}^{25} k^2 i_k^2 (pu) \quad (5.37)$$

Les corrents fonamentals es calculen a partir de la càrrega de cada secció o a partir de mesures directes.

Es calcula el corrent total segons la freqüència. Es considera que la contribució de les càrregues lineals en corrent harmònic és menyspreable.

$$I_1 \approx I_{TOT} = 2192,31 \quad (5.38)$$

$$I_3 \approx I_3^{500} + I_3^{TRANSF} = 58,45A \quad (5.39)$$

$$I_5 \approx I_5^{500} + I_5^{TRANSF} = 300,51A \quad (5.40)$$

$$I_7 \approx I_7^{500} + I_7^{TRANSF} = 75,12A \quad (5.41)$$

$$I_9 \approx I_9^{500} + I_9^{TRANSF} = 36,33A \quad (5.42)$$

Es redueixen les intensitats a la base de *pu*

i_1 (A)	i_3 (A)	i_5 (A)	i_7 (A)	i_9 (A)
0,607	0,042	0,125	0,042	0,02

Taula 5.11 – Reducció de les corrents per a cada freqüència a base de *pu*

$$i_k = \frac{I_k}{\frac{S_B}{\sqrt{3}U_{b2}}} \quad (5.43)$$

$$k = 0,81 \quad (5.44)$$

En el gràfic (**Fig 3.3**) s'observa que la capacitat del transformador no es veu alterada per la contribució dels harmònics.

El transformador està sobredimensionat, encara que la presència d'harmònics a la instal·lació sigui molt elevada no se superarà el punt de funcionament nominal. D'aquí en deriva que l'escalfament del transformador no està provocat per sobrepassar el punt de funcionament nominal.

5.7. Estimació de la ressonància

Es realitza una primera aproximació sobre la ressonància en la instal·lació on es contrastaran els valors teòrics amb els valors mesurats.

Per determinar el valor de la ressonància teòrica es simplificarà el circuit considerant:

- Les impedàncies de càrregues lineals són molt elevades i la intensitat que hi circula és menyspreable.
- S'agrupen totes les càrregues no lineals en una font de corrent.
- Caiguda de tensió als conductors menyspreable.

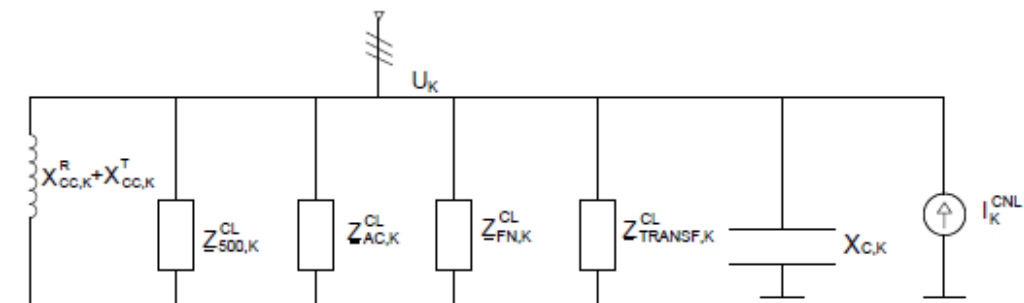


Fig. 5.8 – Circuit equivalent de la instal·lació assumint caiguda tensió al transformador i conductors negligible i agrupant les font de corrent.

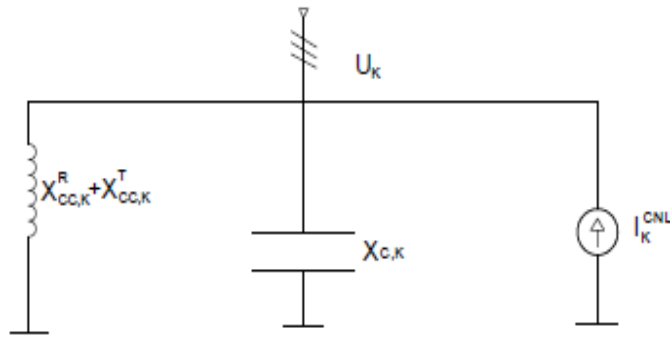


Fig 5.9 – Circuit equivalent de la instal·lació simplificant la Fig 5.8 assumint impedància de les càrregues lineals infinita.

Resultats teòrics

A continuació es determina la impedància equivalent de ressonància com la impedància de la xarxa i transformador amb paral·lel amb el condensador.

$$Z_{EK} = \frac{(X_{cc}^R + X_{cc}^T)X_C}{\left| \frac{X_C}{k} - (X_{cc}^R + X_{cc}^T)k \right|} \quad (5.45)$$

Es busca el valor que provoca que la impedància sigui màxima.

$$Z_{EK} \rightarrow \infty \quad \left| \frac{X_C}{k} - (X_{cc}^R + X_{cc}^T)k \right| = 0 \quad (5.46)$$

S'aïlla la freqüència de ressonància

$$k = \sqrt{\frac{X_C}{X_{cc}^R + X_{cc}^T}} = \sqrt{\frac{0,4}{0,39 \cdot 10^3 + 5,39 \cdot 10^3}} = 8,37 \quad (5.47)$$

Seguidament es contrasta el valor teòric de k amb els resultats mesurats.

Resultats experimentals

$$U_k = Z_{EK} I_K \quad (5.48)$$

$U_{K,M}$ s'obté del valor mig de les tensions harmòniques. Són molt semblants però no idèntiques ja que s'han mesurat en dies diferents.

$I_{K,EK}$ es determina fent la suma de mòduls de les intensitats harmòniques no lineals de cada secció. És a dir sumant les fonts de tensió de la secció 500 i la transferència.

K	$U_{K,M}$	$I_{K,EK}$	Z_{EK}
3	0,56	58,45	0,0096
5	10,9	287,42	0,036
7	5,59	72,61	0,074
9	0,47	22,96	0,021

Taula 5.12 – Impedància equivalent empírica del circuit simplificat per a cada freqüència.

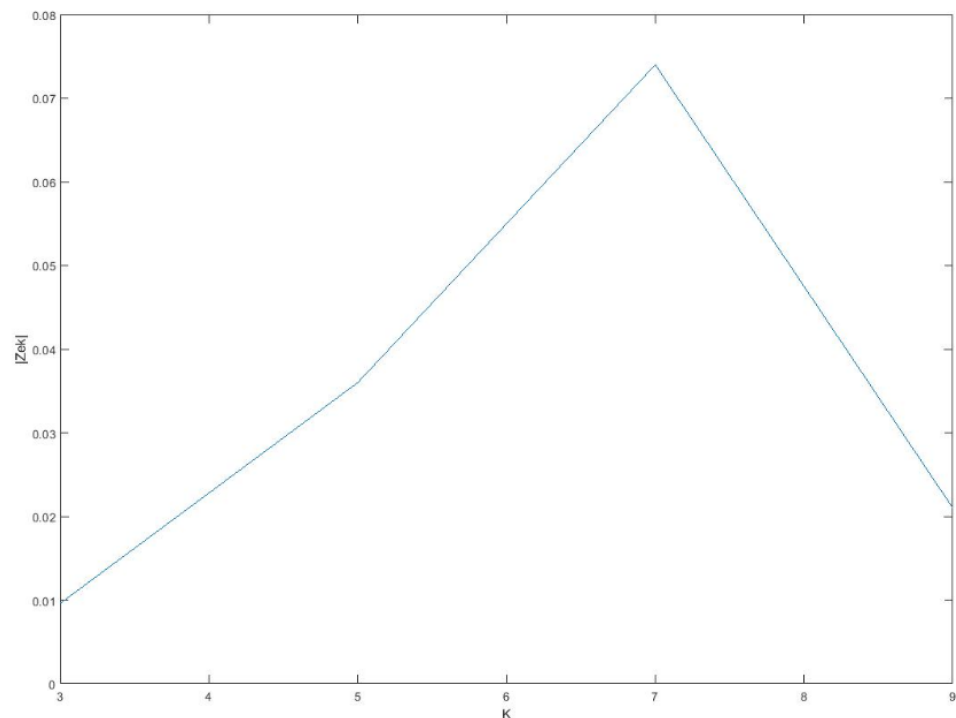


Fig. 5.10 – Representació gràfica de la impedància equivalent del circuit simplificat per a cada freqüència.

El pic de ressonància experimental se situa al setè harmònic i per tant, els resultats experimentals no difereixen gaire dels teòrics. El circuit simplificat situa la ressonància entre el setè i el novè harmònic.

6. SIMULACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

En aquest capítol es simula el circuit plantejat a través del software informàtic *Matlab* i s'interpreten els resultats obtinguts per estar en disposició de valorar possibles solucions. Primerament, s'exposa el mètode de càlcul del circuit (mètode dels nusos) i l'estructura del programa. Posteriorment, es simula el circuit i s'interpreten i els valoren els resultats.

6.1. Formulació del mètode dels nusos

El mètode de càlcul escollit per simular i resoldre el circuit és el mètode dels nusos. Aquest mètode és sistemàtic i es pot programar amb un codi simple. La programació amb *Matlab* permet realitzar els càlculs de forma instantània i tractar de forma agradable dels nombres complexos. A continuació s'exposen de forma breu els conceptes bàsics sobre el mètode dels nusos. [7]

6.1.1. Nodes del sistema

El mètode requereix la definició i numeració de diversos nodes en el diagrama unifilar:

- Node de referència (node 0): habitualment s'utilitza el terra de la instal·lació.
- S'empra un node per cada unió de dos o més ramificacions.

Per reduir el nombre de nodes (n) i simplificar el sistema enlloc d'utilitzar l'equivalent de Thévenin de la xarxa s'empra el de Norton de forma que el sistema es redueix:

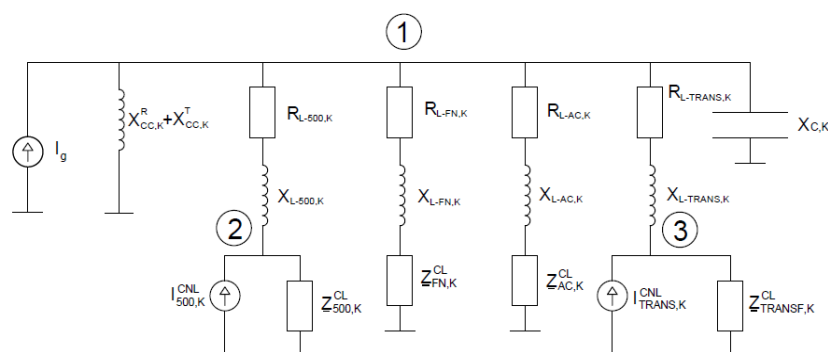


Fig 6.1 – Equivalent de Norton del circuit de la instal·lació i numeració dels nodes

6.1.2. Matriu d'admitàncies

És una matriu quadrada simètrica de dimensió igual al nombre de nodes sense tenir en compte el de referència. Aquesta matriu es defineix a partir de l'estructura de nodes que s'ha definit anteriorment i al realitzar un anàlisi freqüencial depèn de l'ordre del harmònic. Els elements de la diagonal ($\underline{y}_{i,i}$) s'obtenen sumant totes les admitàncies que estan connectades al node i . Els elements que no són de la diagonal ($\underline{y}_{i,j}$) s'obtenen canviant el signe de la suma de les admitàncies que es situen entre el node i i el j .

$$\underline{Y}_{i,i} = \sum_{j=1}^N (\underline{y}_{i,j} + \underline{y}_{j,i}) \quad (6.1)$$

$$\underline{Y}_{i,j} = (-1) \sum_{a=1}^M \underline{y}_{i,ja} \quad (6.2)$$

Per calcular les impedàncies només cal invertir la matriu d'admitàncies.

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1} \quad (6.3)$$

6.1.3. Vector d'intensitats

Es construeix la fila i del vector considerant totes les fonts de corrent que estan connectades al node i . Per conveni de signes, si la corrent entra al node el valor és positiu i negatiu altrament. El circuit plantejat apareixen tres fonts de corrent per a cada ordre d'harmònic.

6.1.4. Resolució

El sistema ve determinat a través de la següent expressió:

$$\underline{U}(k) = \underline{Y}(k)^{-1} \underline{J}(k) \quad (6.4)$$

Les incògnites són les tensions harmòniques de cada node $U_i(k)$

És necessari resoldre k sistemes de n equacions i per tant, $k \cdot n$ incògnites en total. El sistema a estudiar al tenir 3 nodes i estudiar 5 freqüències diferents i per tant s'han de resoldre 5 sistemes de 3 equacions i s'han de determinar 15 incògnites en total.

6.2. Estructura i notació del programa

La programació es basa en un bucle realitzat amb la comanda *for* que recorre totes les freqüències realitzant els càlculs pertinents. Per realitzar els càlculs per a la freqüència fonamental s'aplica un condicional *if* que permet especificar-ne els valors.

En primer lloc, s'emmagatzemen les corrents no lineals ($I_{CNL_Secció}$) en la *Matriu C* ja que relacionar aquestes variables elèctriques empíriques amb una funció que depengui k no és evident. Amb el bucle *for* es va recorrent la matriu segons l'ordre de l'harmònic i la càrrega.

Seguidament es defineixen els paràmetres i variables que es poden relacionar directament amb la l'ordre de l'harmònic k :

- Reactància de la xarxa, transformador i condensador: $X_{CC}^R(k)$, $X_{CC}^T(k)$, $X_C(k)$
- Impedàncies de línia: $Z_{Cable}(k)$
- Impedàncies càrrega lineal: $Z_{CL_secció}(k)$

A continuació es construeix la matriu d'admitàncies per a cada freqüència, el vector de fonts de tensió i s'aplica el mètode del nusos.

Seguidament, es descriu la notació emprada en el programa per tal d'identificar temes en el codi i per obtenir resultats en el *command window*.

Paràmetres instal·lació

X_{cc_R} : reactància de la xarxa depenent de k

X_{cc_T} : reactància del transformador depenent de k

$X_{condensador}$: reactància del condensador depenent de k

$Z_{\text{cable_secció}}$: impedància ($R+jX$) de cada 'secció' de la instal·lació. Depèn de k . 'secció' pot prendre els següents valors [500, FN, AC, trans]

Variables elèctriques

I_g : Intensitat de Norton de la xarxa dependent de k

C : Matriu on es guarden els valors de les fonts de corrent no lineal de cada secció. Matriu 5x2 on cada columna representa la càrrega (500 i transferència) i cada fila la freqüència (1, 3, 5, 7, 9).

J : Vector de fonts de corrent a la freqüència k , amb $n=3$ files

Càlculs i resultats

Y : Matriu d'admitàncies a la freqüència k de dimensió $i \times j$ (3×3) formada per $Y_{ij}(k)$

U : Vector que emmagatzema totes les tensions harmòniques

Zek : Vector que guarda el valor absolut de les impedàncies globals en el node 1 per a cada freqüència (1 fins 25).

TDH_u : valor de la distorsió harmònica total en tensió considerant fins l'ordre 9.

Per últim, en referència al capítol que s'explica a continuació cal comentar que per defecte el programa no retorna la resposta freqüencial refinada. Retorna una resposta freqüencial discretitzada a l'ordre dels harmònics que s'estudien. No obstant, per reduir l'interval de la discretització la modificació del codi és mínim. En primer lloc cal reduir els intervals que recorre el vector k : $k=1:0.1:25$.

Seguidament s'inhabiliten les línies de codi que calculin tensions. Són les línies que es troben a continuació del avís (*%Càlcul de tensions*). Finalment es modifica la funció plot d'acord amb els nous punts que volem representar $x=1:0.1:25$.

6.3. Resposta freqüencial

En aquest apartat s'explica com afegir al programa la impedància global en cada node del sistema en funció de la freqüència. Concretament, observant el comportament de la impedància global al node 1 es pot determinar la freqüència de ressonància del sistema. A partir d'aquesta informació es poden validar les simplificacions prèvies (capítol 5.7) i posteriorment cercar la solució al problema.

Pel càlcul de la impedància global en el node 1, es realitza el producte de la inversa de la matriu d'admitàncies per un vector de de 0 on només es col·loca un 1 en el node on es vulgui calcular la impedància.

$$\begin{bmatrix} Z_{EK,1}(k) \\ Z_{EK,2}(k) \\ Z_{EK,3}(k) \end{bmatrix} = Y^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Del vector resultant seleccionem el valor de la primera fila ($Z_{EK,1}(k)$) i li realitzem el valor absolut.

Finalment s'agrupa cada impedància resultant de cada freqüència en un següent vector i es gràfica freqüencial.

$$Z_{EK} = [Z_{EK,1}, Z_{EK,3}, Z_{EK,5}, \dots, Z_{EK,25}] \quad (6.6)$$

El programa retorna el gràfic de la impedància equivalent en el node 1 en funció de l'ordre harmònic.

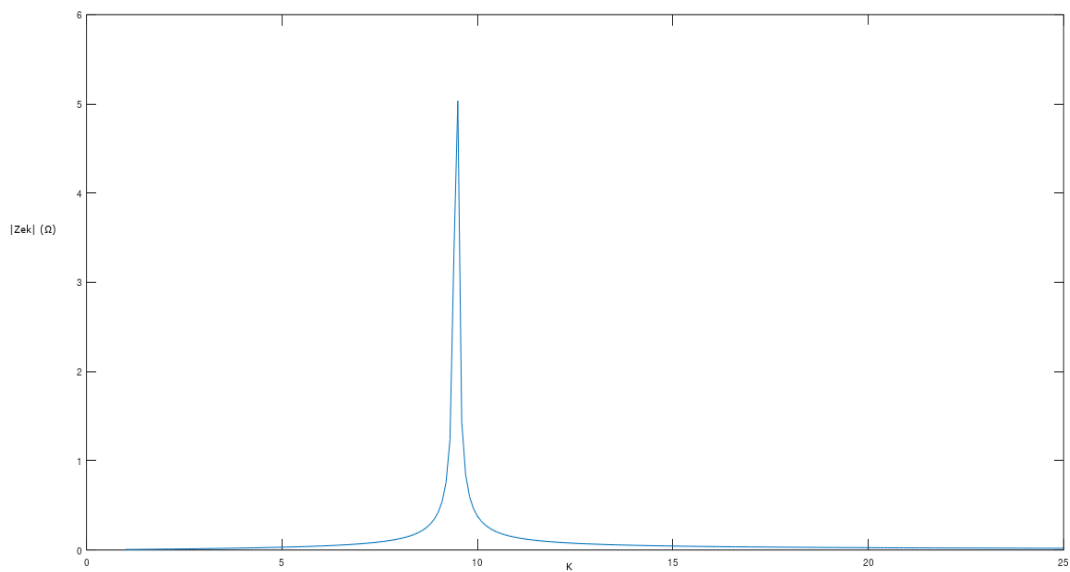


Fig 6.2 – Resposta freqüencial del sistema en el node 1

La freqüència de ressonància es situa a l'harmònic d'ordre 9. En el circuit simplificat (capítol 5.7) s'ha vist que el valor teòric era també de 9 i l'experimental 7. Per tant, hi ha concordança entre el circuit simplificat i el simulat.

Es pot concloure que el problema que existeix un problema de ressonància entre les càrregues i la bateria de condensadors en l'harmònic d'ordre 9 (450Hz).

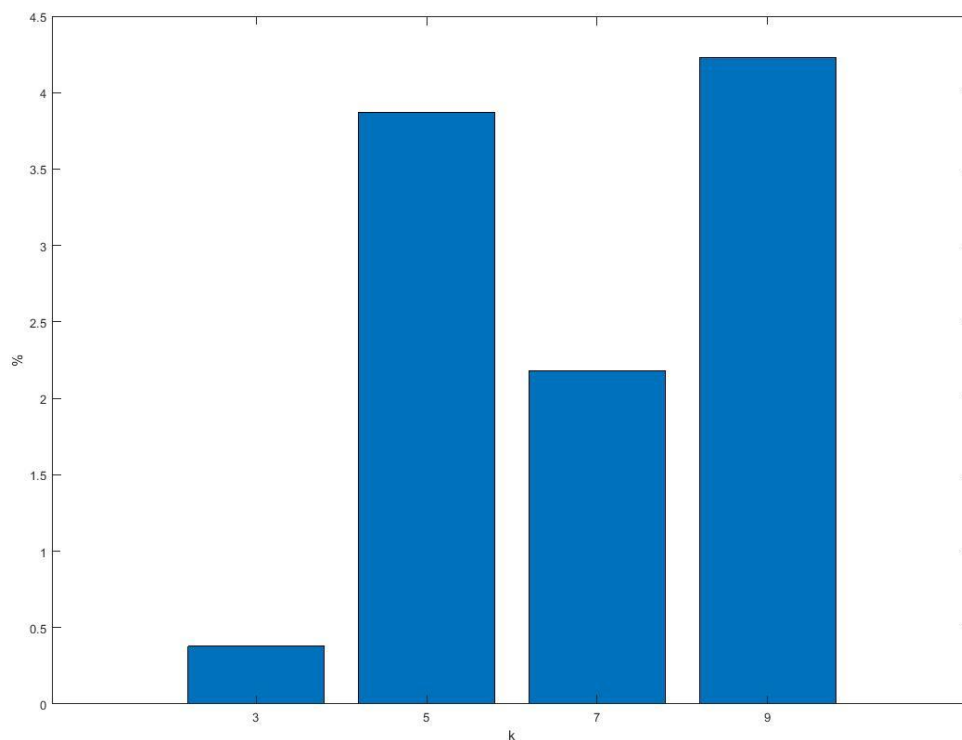
6.4. Penetració harmònica

Consisteix en representar gràficament la taxa de distorsió individual i calcular la taxa de distorsió harmònica per valorar l'impacte de la càrrega no lineal en el circuit modelitzat. També es comprova que les tensions harmòniques s'aproximen a les mesures empíriques en la instal·lació. Addicionalment, aquests valors es comparen amb els càlculs manuals del circuit simplificat.

6.4.1. Resultats

La simulació del circuit proporciona una taxa de distorsió harmònica total en tensió del 6,15% i les tensions en el node 1 a cada freqüència es presenten en la següent taula. Destaca la presència del cinquè harmònic (habitual en harmònics provocats per variadors de freqüència) i del novè fruit de l'amplificació per la ressonància en aquesta freqüència.

k	1	3	5	7	9
U_k (V)	228,52	0,87	8,85	4,99	9,67

Taula 6.1 – *Tensions en funció de la freqüència en el node 1***Fig 6.3** - *Taxa de distorsió individual (%) per a cada freqüència*

6.4.2. Validació de les resultats

Els resultats de la simulació es comparen amb els mesurats empíricament en la instal·lació i els resultats manuals del circuit simplificat.

En primer lloc, es calculen les tensions i la taxa de distorsió harmònica total en el circuit simplificat (**Fig 5.9**)

$$U_{EK,k} = Z_{EK,k} I_{EK,k} = \frac{(X_{cc}^R + X_{cc}^T)X_C}{\left| \frac{X_C}{k} - (X_{cc}^R + X_{cc}^T)k \right|} I_{EK,k} \quad (6.7)$$

k	1	3	5	7	9
$ U_{EK,k} $ (V)	230,94	1,14	12,76	9,66	7,55

Taula 6.2 – Tensions per a cada freqüència en el circuit simplificat

$$THD_u = 100 \frac{\sqrt{\sum_{k=3}^9 U_{EK,k}^2}}{U_{EK,1}} = 7,67 \% \quad (6.8)$$

$K \setminus U_{EK,k} $ (V)	Empíric	Simulació	Simplificat
1	230,94	228,52	230,94
3	0,56	0,87	1,14
5	10,9	8,85	12,76
7	5,59	4,99	9,66
9	0,47	7,55	7,55
THD_U	5,5	6,15	7,87

Taula 6.3 – Comparació entre la instal·lació real, el model simulat i el model simplificat de les tensions per a cada freqüència i de la THD en tensió.

Es constata que la simulació descriu el comportament de la instal·lació real amb una precisió acceptable. No obstant, els resultats divergeixen del valor empíric quan ens situem en la freqüència de ressonància. Aquest fenomen es a causa de l'augment brusc de la impedància de ressonància que incrementa la tensió i allunyant-la del valor mesurat.

En la taxa de distorsió harmònica, els valors obtinguts sempre són superiors als reals, per tant la simulació amplifica la presència harmònica. Aquesta sobredimensió de la distorsió provocada la càrrega no lineal pot ser conseqüència de no haver considerat fase en les corrents harmòniques.

Els circuit simplificat encara que no és tant precís com la simulació, s'ajusta raonablement a

la realitat. A més segueix les mateixes tendències: en la freqüència de ressonància és on la tensió presenta més error i amplifica la taxa de distorsió harmònica total.

7. VALORACIÓ DE SOLUCIONS

L'objectiu d'aquest capítol és cercar i proposar una mesura concreta que disminueixi la presència harmònica. Primerament s'explora el mercat per tenir en compte totes les opcions que s'ofereixen i quines característiques tenen. Es consulten tècnics del sector per tenir una visió més àmplia de models concrets i de procediments habituals. Seguidament es simulen les propostes al programa amb *Matlab* per confirmar que l'efecte és l'esperat i valorar la proposta òptima. Finalment, es descriu el procediment per realitzar un estudi com el realitzat en aquest TFG en altres sectors de la planta industrial. Les tres propostes que es valoren són: filtre passiu, inductàncies de filtrat i filtre actiu.

7.1. Possibilitats del mercat

Es descriuen breument les característiques dels filtres passius, les inductàncies de filtrat i dels filtres actius que el mercat ofereix.

Filtres passius

La primera acció que es valora és instal·lar un filtre passiu substituint l'actual bateria de condensadors per reduir l'amplificació harmònica. El filtre consisteix en una inductància i un condensador sintonitzats a una certa freqüència que desplaça la freqüència de ressonància fins a la de sintonització.

A continuació s'exposen les característiques que ofereixen les dues grans multinacionals del sector elèctric que s'han consultat (*Schneider Electric* i *ABB*).

- Cap de les dues marques ofereixen la possibilitat de dimensionar de forma específica la reactància de filtrat, sempre són bobines i condensadors sintonitzats a una freqüència estàndard que corregeix la ressonància en un gran nombre d'escenaris.
- No existeix la possibilitat de comprar un filtre per parts. Sempre es ven el filtre passiu integrat per la inductància i la bateria de condensadors.
- Els filtres passius poden incorporar un interruptor automàtic a la capçalera.

Inductàncies de filtrat

Les inductàncies de filtrat actuen directament sobre la càrrega lineal reduint la taxa harmònica. Consisteix en localitzar el variador de freqüència responsable de la distorsió i connectar-hi la inductància de filtrat en sèrie. És la opció més econòmica però requereix conèixer amb profunditat el conjunt de la instal·lació. Per modelitzar les inductàncies de filtrat es redueixen les fonts corrent multiplicant-les per un valor entre 0 i 1. D'aquesta manera no es modelitza pròpiament la inductància si no l'efecte que se li sol·licita. El percentatge de corrent no lineal que s'ha de reduir per obtenir uns resultats satisfactoris.

Filtres actius

Representa l'acció més cara però la més eficaç (veure Annex 4). Requereix una decisió de compromís entre el cost i la reducció de distorsió que es vol obtenir. Actua sobre tota la càrrega i s'ubica en el secundari del transformador.

El mercat ofereix dos tipus de filtres actius: els que eliminen la presència harmònica i el que a més d'eliminar la presència harmònica estableixen el factor de potència desitjat. La diferència de preus entre els tipus també es destacable.

Generalment, els filtres passius i les inductàncies de filtrat són les primer opcions que es contemplen per ser les més econòmiques. Si el resultat no és satisfactori s'opta pel filtre actiu. També existeixen opcions intermèdies com utilitzar inductàncies de filtrat per reduir el contingut harmònic en intensitat de forma local (en cada càrrega lineal) per posteriorment utilitzar un filtre actiu per acabar de reduir el contingut harmònic. La reducció inicial dels harmònics de corrent permet escollir un filtre actiu més econòmic.

7.2. Efectes sobre el sistema

És interessant poder avaluar quin és el benefici de cada proposta abans de decidir la solució a aplicar. Per aquest motiu, s'ha desenvolupat una aplicació de *Matlab* que permet simular el comportament harmònic de la instal·lació de forma que es poden implementar les mesures correctores proposades i comparar el resultat final obtingut amb el que es tenia prèviament. Aquest punt del projecte és imprescindible per escollir l'opció més adequada.

7.2.1. Filtre passiu

Simular l'impacte d'un filtre passiu en la instal·lació és immediat. A nivell de programació, només cal canviar el valor de la reactància del condensador ($X_{condensador}$) i introduir una nova variable en el codi (X_{filtre}) i acoblar-la a la matriu d'impedàncies.

El model de filtre escollit (VLVAF5P03518AB) té una freqüència de sintonització ($K_{rs,F}$) de 190 Hz (ordre 3,78), una potència reactiva de 400 kVAr i sense interruptor automàtic de capçalera (Veure Annex 4). No es contempla la incorporació de l'interruptor automàtic de capçalera perquè el sistema ja disposa de múltiples sistema de protecció i la diferència de preu és d'uns 2200€.

Es calcula la reactància de la bateria de condensadors i de la bobina:

$$X_{C,1} = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 K_{rs,F}^2}{Q_{F,1}(K_{rs,F}^2 - 1)} = \frac{230,94 \cdot 3,78^2}{400 \cdot 10^3(3,78^2 - 1)} = 0,6797 \, \Omega \quad (7.1)$$

$$X_{L,1} = \frac{X_{C,1}}{k_{rs,F}^2} = \frac{0,6797}{3,78^2} = 0,0476 \, \Omega \quad (7.2)$$

$$L = \frac{X_{L,1}}{100\pi} = 151,42 \, \mu H \quad (7.3)$$

$$R = \frac{K_{rs,F} X_{C,1}}{q} = \frac{3,78 \cdot 0,0476}{30} = 0,006 \, \Omega \quad (7.4)$$

El valor de la resistència interna de la bobina és menyspreable davant els valors reactius i no es considera en la simulació.

Els resultats obtinguts mostren que:

- El pic de ressonància es desplaça a una freqüència propera a la de sintonització del filtre.

- El valor de la impedància de ressonància es redueix dràsticament.
- A partir de 200Hz el filtre té un comportament inductiu i es comporta linealment.
- La taxa de distorsió harmònica total es redueix significativament, fins al 2,52 %
- Naturalment les distorsions individuals també disminueixen de forma notable.

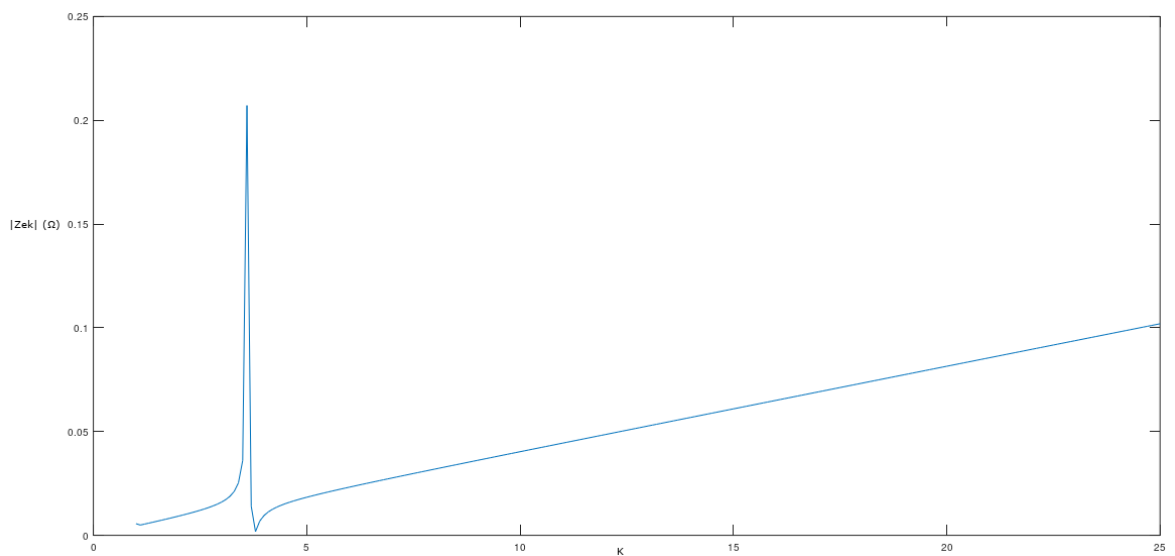


Fig 7.1 – Desplaçament de la freqüència de ressonància per efecte del filtre passiu

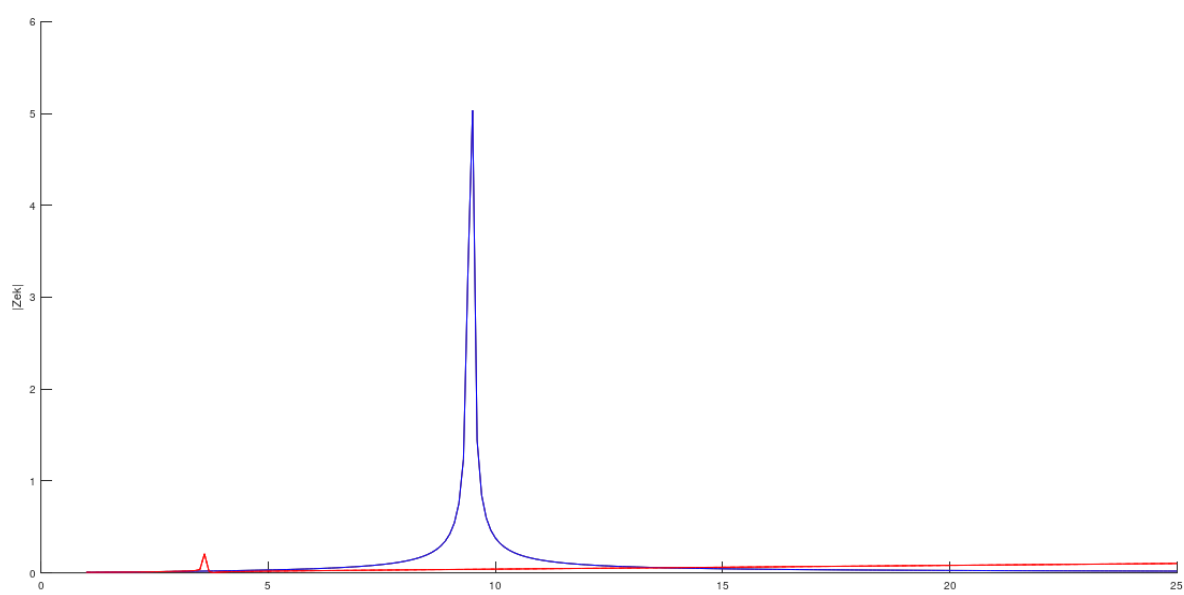


Fig 7.2 –Posició relativa de la freqüència de ressonància sense filtre (blau) i amb filtre (vermell)

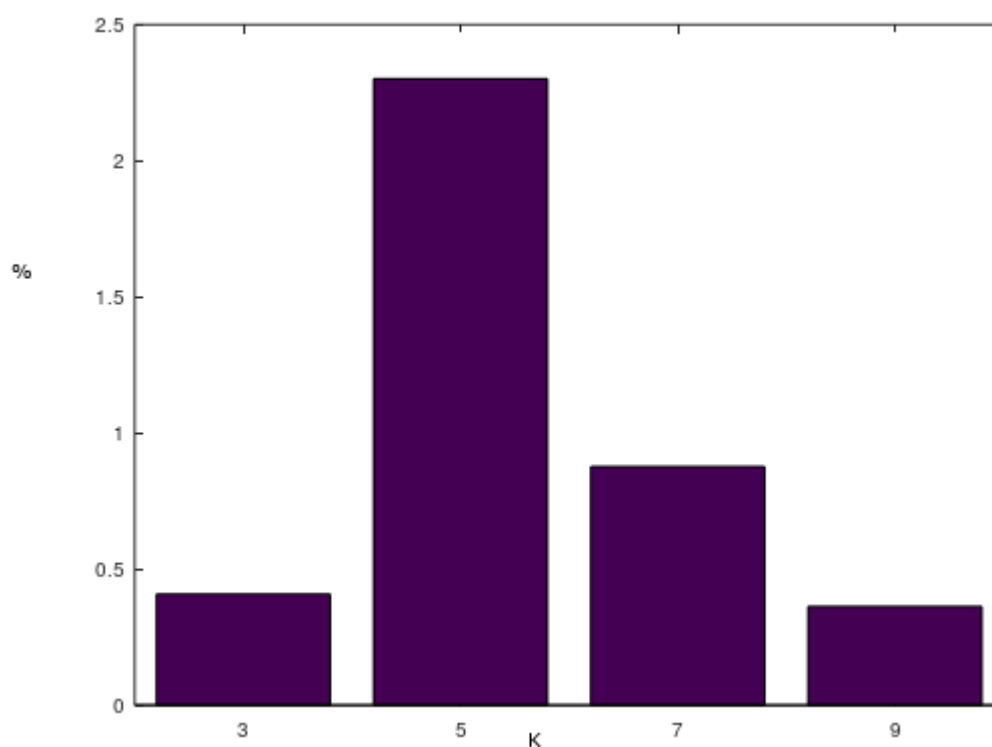


Fig 7.3 – Efecte del filtre en la taxa de distorsió individual en tensió

Cal destacar la importància de calcular correctament el valor de reactància equivalent de la bobina. L'objectiu no és trobar el punt que minimitza l'impacte harmònic ja que es necessita un cert marge de freqüències per assegurar que el filtre sempre té comportament desitjat.

Un procediment habitual per evitar aquest cas és dissenyar filtres sintonitzats amb en menor harmònic present en el circuit de manera que la ressonància en paral·lel segur que mai s'amplifica

Per exemple, per a un $X_{\text{filtre}}=0,025 \Omega$ el resultat de la simulació és de una THD_U del 2,83 %. Només reduint el valor de la reactància fins a $0,022 \Omega$ la THD_U passa a ser del 20,27% . En aquest punt la freqüència de ressonància correspon amb l'harmònic amb més presència i la taxa de distorsió individual d'aquest s'amplifica.

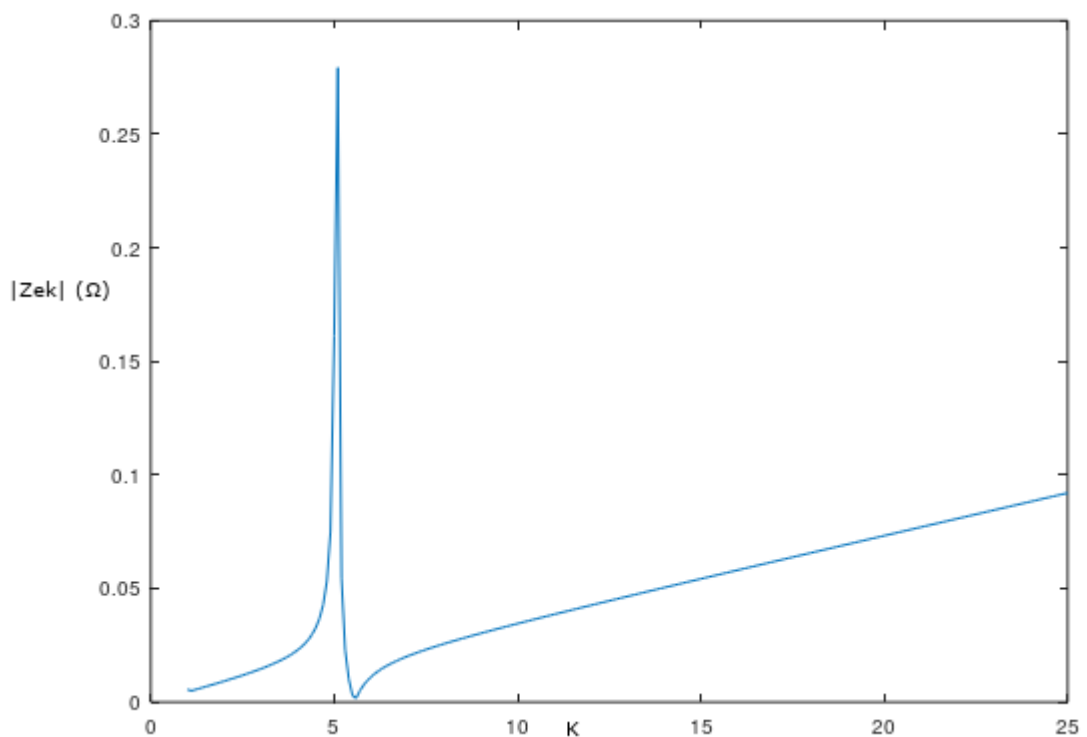


Fig 7.4 – Desplaçament de la freqüència de ressonància a 250 Hz

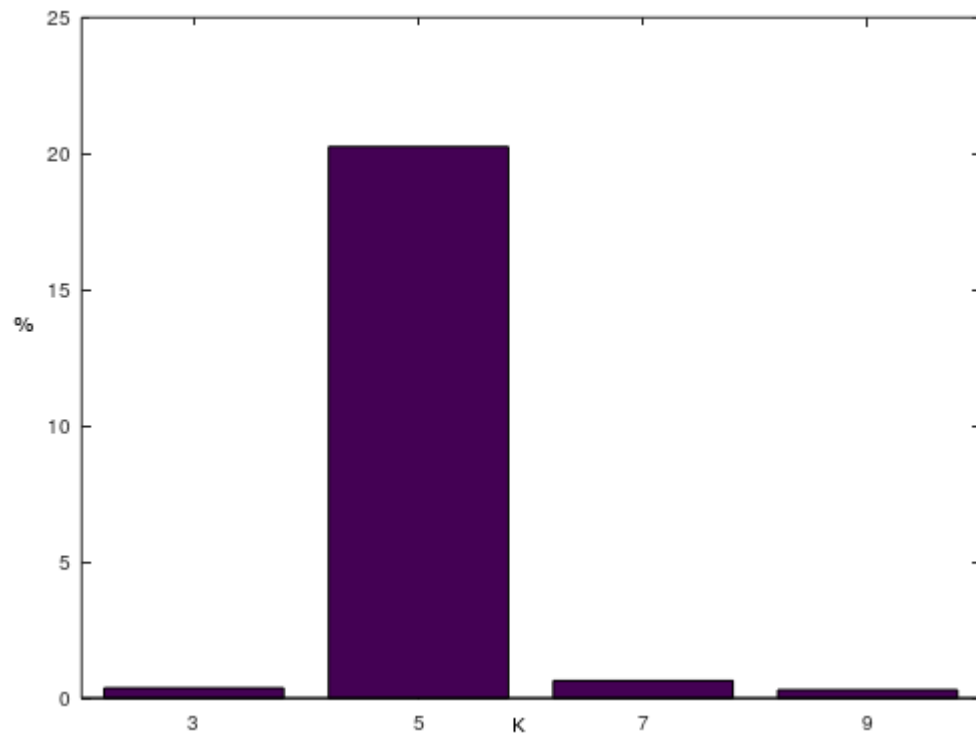


Fig 7.5 – Amplificació de la tensió del cinquè harmònic

7.2.2. Inductància de filtrat

S'introdueix al codi l'efecte de la inductància de filtrat amb la variable *alpha* que multiplica la matriu de fonts de corrent no lineal (*C*). La potència de càlcul permet iterar fins a trobar un valor que redueixi la THD_U fins al valor adequat.

Per a $\alpha=0,85$ es redueix el THD_U fins a 4,91. Aquest valor, encara que segueix sent considerable es situa dins de la normativa (Veure Annex 3)

Així doncs, les corrents produïdes per les càrregues no lineals (secció 500 i transferència) s'han de reduir com a mínim un 15%.

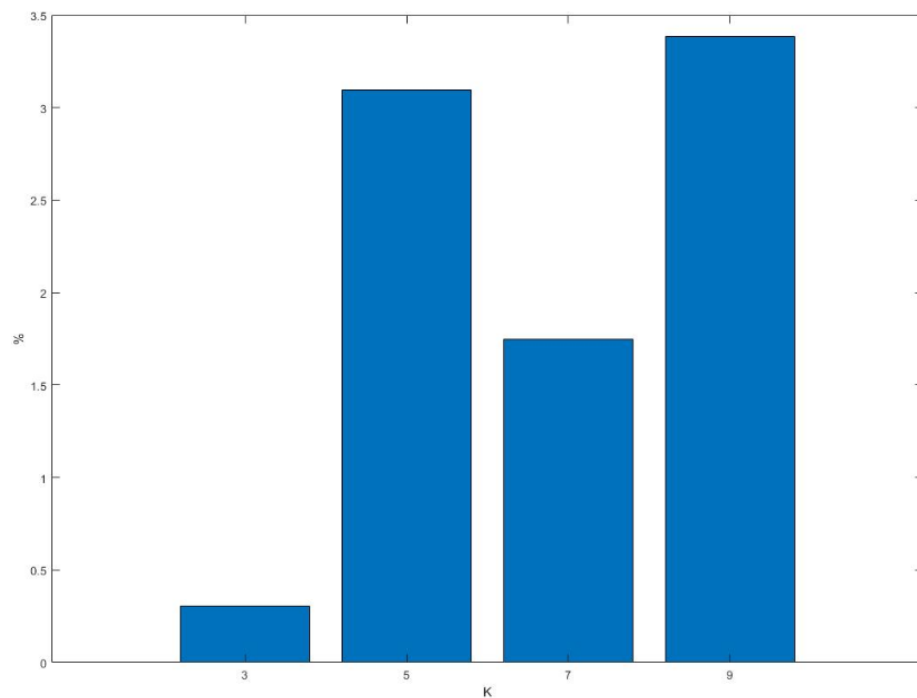


Fig 7.6 – *Impacte de la inductància de filtrat en la distorsió individual en tensió*

7.2.3. Especificació del filtre actiu

El filtre actiu presenta una gran efectivitat i els efectes en el sistema són pràcticament immillorables. Per introduir-lo al model simplement s'hauria de suposar que les corrents harmòniques es redueixen un 99% (*alpha* igual a 0,01).

El filtre actiu seleccionat és el *AccuSine PCS+* (Veure Annex 4). És un model adequat per la indústria pesada, corregeix el factor de potència, equilibra càrregues i elimina harmònics.

A continuació s'especifiquen les sol·licitacions del filtre actiu *AccuSine PCS+* que la instal·lació requereix.

La intensitat destinada a compensar la potència reactiva.

$$I_r = \frac{Q}{\sqrt{3}U} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577,35 \text{ A} \quad (7.5)$$

La intensitat destinada a eliminar harmònics.

$$I_f = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2} = \sqrt{58,45^2 + 300,51^2 + 75,12^2 + 36,33^2} = 317,31 \text{ A} \quad (7.6)$$

7.3. Proposta de solució

Els resultats obtinguts en la simulació del filtre passiu són molt positius. La taxa de distorsió harmònica total es redueix significativament (fins al 2,52 %) i s'obté un comportament inductiu de la impedància del filtre per a freqüències on hi ha corrent harmònica. El valor de la reactància del filtre té un marge de valors possibles suficientment gran com per no amplificar el cinquè harmònic. Addicionalment, la substitució de la bateria de condensadors pel filtre passiu sintonitzat és una operació relativament econòmica i sense una execució complexa.

Es proposa substituir les bateries de condensadors actuals per les bateries de condensadors *VarSet Premium SAH amb inductàncies antiharmònics 190Hz* (VLVAF5P03518AB) de *Schneider Electric*.

7.4. Extrapolació a altres punts de la instal·lació

Es pretén exposar el procediment a seguir per realitzar un estudi harmònic com el realitzat en aquest treball en les altres parts de la instal·lació. Es considera tot l'esquema unifilar (Veure Annex 2) modelitzat seguint els mateixos criteris que en el Capítol 5.

Si es considera que la impedància de la xarxa és menyspreable davant la del transformador es pot tractar cada transformador i la instal·lació que en deriva com a circuits independents. Aquest fet genera una gran simplificació del circuit equivalent de tota la planta i permet plantejar cada sector de forma idèntica al d'aquest estudi. Realitzant unes modificacions mínimes al mateix programa dissenyat, és possible obtenir valors que SCADA no

proporciona en qualsevol punt de la instal·lació sense necessitat de mesures. Particularment, és interessant conèixer les distorsions harmòniques en tensió.

$$\text{Si } X_{cc}^R = 0,32\text{m}\Omega \ll 5,39\text{m}\Omega = X_{cc}^T \quad (7.7)$$

Els circuits resultants aigües avall de cada transformador són:

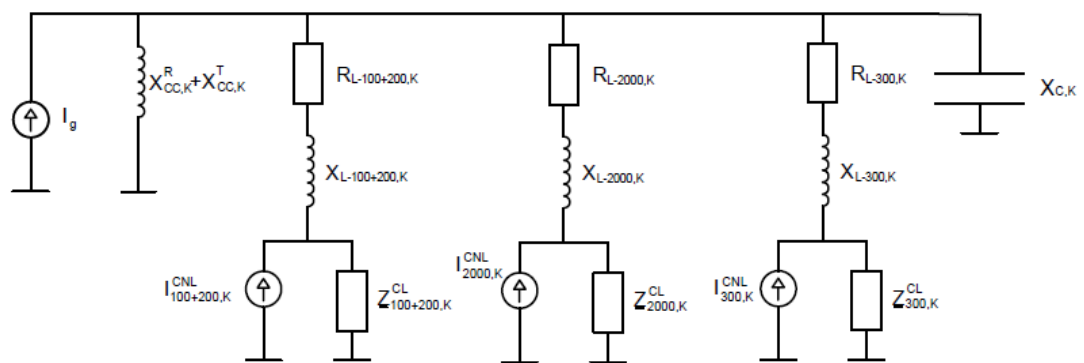


Fig 7.7 – Circuit equivalent aigües avall del transformador 2

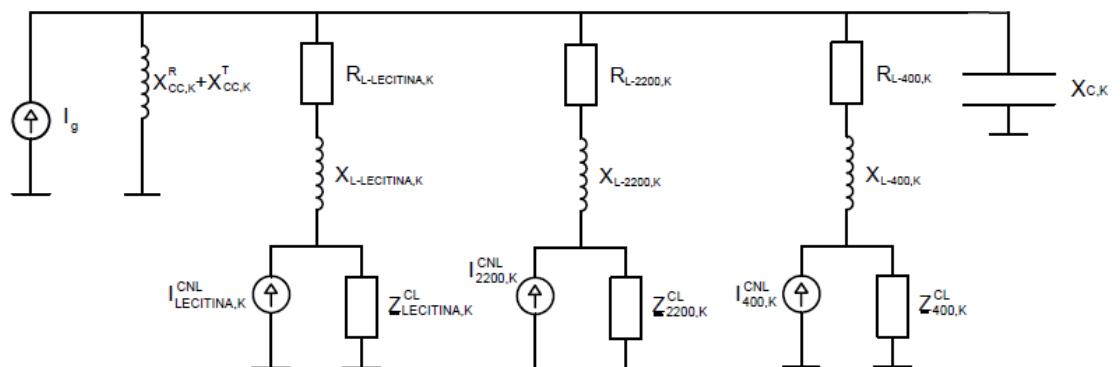


Fig 7.8 – Circuit equivalent aigües avall del transformador 3

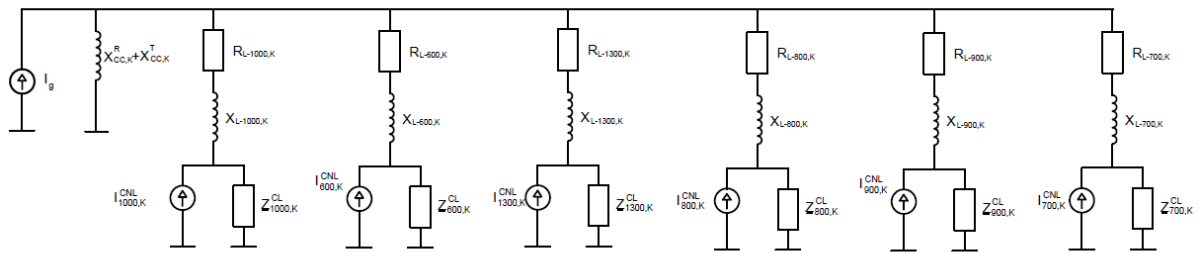


Fig 7.9 – *Circuit equivalent aigües avall del transformador 4*

Tal com s'ha comentat, per estudiar els circuits anteriors, es pot aplicar tant el programa realitzat com l'ús partir d'aproximacions com les realitzades per obtenir el circuit simplificat de la **Fig 5.9** . Aquests dos mètodes permeten preveure possibles problemes harmònics i avaluar les propostes de solució.

8. ANÀLISI ECONÒMIC I AMBIENTAL

En aquest darrer capítol es quantifica econòmicament i ambientalment la solució proposada.

8.1. Anàlisi econòmic

Pel càlcul del cost del projecte es tenen en compte tots els recursos necessaris per a la seva realització. Es contempla tant l'elaboració del propi projecte com la posterior execució.

Considerant el nombre d'hores que requereix un Treball de fi de Grau (360h) i el sou mínim fixat per l'escola per un alumne de grau en pràctiques (8€/h) es calcula el valor del temps invertit per l'autor. També és necessari contemplar la llicència del programari *Matlab* ja que és un recurs tècnic que s'ha utilitzat i que no ha sigut facilitat per l'empresa interessada.

Per determinar el cost d'execució del projecte només cal considerar el preu del filtre escollit que s'extreu directament del catàleg (veure Annex 4)

Concepte	Cost
Treballador	2.880 €
<i>Matlab</i>	400 €
Filtre passiu	15.884 €
Suma	19.164 €
IVA	4.024,44 €
TOTAL	23.188,44 €

Taula 8.1 – Costos del projecte

8.2. Anàlisi ambiental

La correcció d'harmònics té un efecte positiu tant en la instal·lació com en el medi ambient. Aparentment no sembla que hi pugui tenir un impacte significatiu però si s'analitza la situació amb deteniment s'observen els següents punts:

- Una instal·lació amb una qualitat elèctrica deficient implica unes pèrdues energètiques considerables. Actualment, a Espanya aproximadament un terç de l'energia consumida prové de recursos energètics d'origen fòssil i per tant, els harmònics provoquen contaminació innecessària.
- La fabricació d'aparells elèctrics i electrònics genera un impacte evident sobre l'entorn durant tot el seu cicle de vida. Una bona dimensió de la instal·lació i un manteniment correcte dels seus elements són dos punts clau per reduir el consum d'aparells elèctrics i electrònics.
- Els residus elèctrics i electrònics es minimitzen si el seu manteniment ha sigut òptim.

Conclusions

En la realització del treball es segueix una estructura lògica començant per entendre la naturalesa del estudi a realitzar i les característiques de la instal·lació. A partir d'aquí, es modelitza la part de la planta que és d'interès, s'obtenen els valors de les variables elèctriques i dels paràmetres de la instal·lació i es determina el circuit equivalent.

Es realitza un estudi teòric i analític del problema per tenir una idea preliminar aproximada de la problemàtica de la instal·lació i les possibles solucions. Posteriorment, es desenvolupa un programa en *Matlab* per simular el comportament del circuit i poder calcular de forma més precisa les distorsions harmòniques en tensió i el resultat de possibles actuacions en la instal·lació.

El programa creat permet estudiar freqüencialment el circuit equivalent tant per analitzar l'estat de la instal·lació com per valorar solucions amb rigor. L'entorn gràfic facilita la visualització de resultats i la seva interpretació. No obstant, les grans virtuts del programa són la capacitat d'actualització i la versatilitat respecte a altres parts de la planta. El conjunt de càrrega no lineal es troba en constant canvi i a través del programa es pot valorar l'impacte de modificar la potència instal·lada de variadors de freqüència. També es poden conèixer valors de variables que SCADA no proporciona com la distorsió individual en tensió en el node d'una secció. Per extrapolar el programa només es necessari modificar la matriu d'admitàncies d'acord amb els circuits equivalents derivats de cada transformador.

La simulació determina que existeix ressonància al novè harmònic entre les càrregues inductives i la bateria de condensadors. La solució proposada és la incorporació d'un filtre passiu en paral·lel amb les altres seccions en substitució de la bateria de condensadors. Aquesta modificació reduiria la taxa de distorsió harmònica fins al 2,52 % reduït a la meitat la presència harmònica. Addicionalment, es valoren i es dissenyen altres possibles solucions a contemplar en el futur com les inductàncies de filtrat i els filtres actius.

Per altra banda, es conclou que el transformador número 1 no està afectat pels harmònics ja que aquest està sobredimensionat, actualment la corrent que hi circula és molt inferior a la corrent nominal.

El departament de manteniment ha de disposar dels recursos necessaris per garantir una

bona qualitat elèctrica. El desenvolupament d'aquest projecte aporta un conjunt d'eines i conclusions tant teòriques com pràctiques que contribueixen a assolir aquest objectiu

Agraïments

Agrair de la forma més sincera al Dr. Luís Sainz la dedicació, l'atenció i la voluntat constructiva en la realització d'aquest treball. Les seves aportacions i els seus coneixements han sigut fonamentals.

Agrair també al departament de manteniment de *Bunge Ibérica* del port de Barcelona per haver-me donat l'oportunitat de realitzar l'estudi i facilitar-me els mitjans. Especialment al supervisor elèctric, José Onteniente, per la seva experiència i coneixement del sector. .

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] SAINZ, L. *Power Quality and Renewable Integration Networks*. Barcelona: ETSEIB 2018
- [2] SCHNEIDER ELECTRIC. *Soluciones para la atenuación de armónicos*. [Fitxa tècnica] 2019
- [3] CÓRCOLES, F PEDRA, J. SALICHS, M. *Transformadores*. Edicions UPC, Colecció Politext. Barcelona, 2004
- [4] ABB. *Corrección del factor de potencia en instalaciones de baja tensión* [Fitxa tècnica] 2019
- [5] FLUKE CORPORATION, *Digital multimers. Manual de uso* [Fitxa tècnica]. 2007
- [6] CÓRCOLES, F. PEDRA, J. SAINZ, L. *Harmonic modeling of induction motors*. Barcelona 2004
- [7] PEDRA, J. *Circuitos monofásicos y trifásicos*. Edicions UPC, Colección Aula ETSEIB. Barcelona 1993

Bibliografia complementària

- HERRAINZ, S. SAINZ, L. *Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas*. Tesi doctoral. Barcelona 2002
- MESAS, J. SAINZ, L. *Estudio y caracterización de cargas no lineales*. Tesi doctoral. Barcelona 2009

ANNEX

ANNEX 1: CARACTERÍSTICAS DE LA INSTAL-LACIÓ

Placa de característiques dels transformadors 1,2,3 i 4

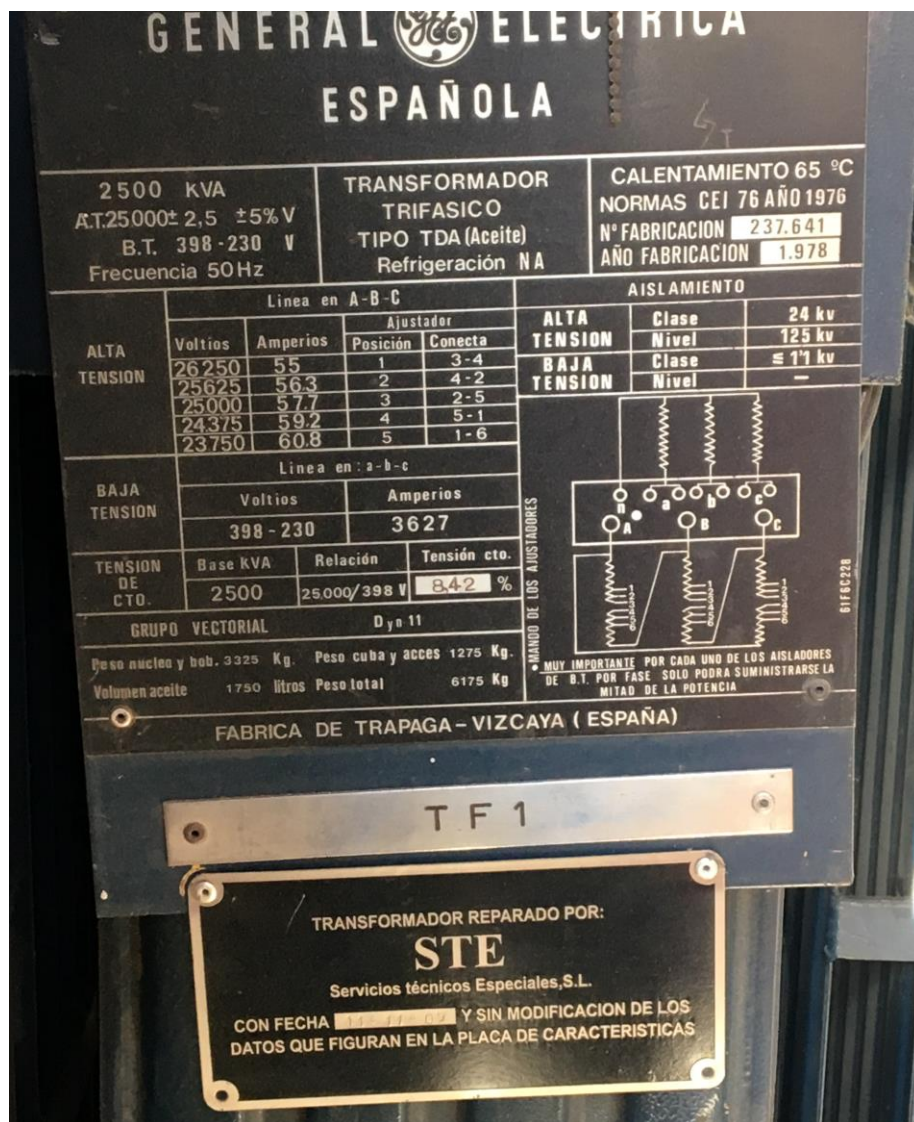


Diagrama unifilar planta: cel·la de cogeneració i protecció general

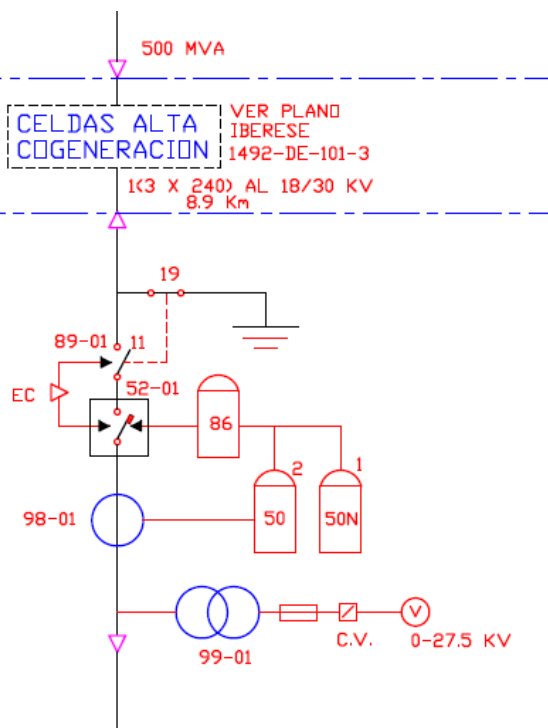


Diagrama unifilar: protecció i cel·les transformadors 1, 2,3 i 4

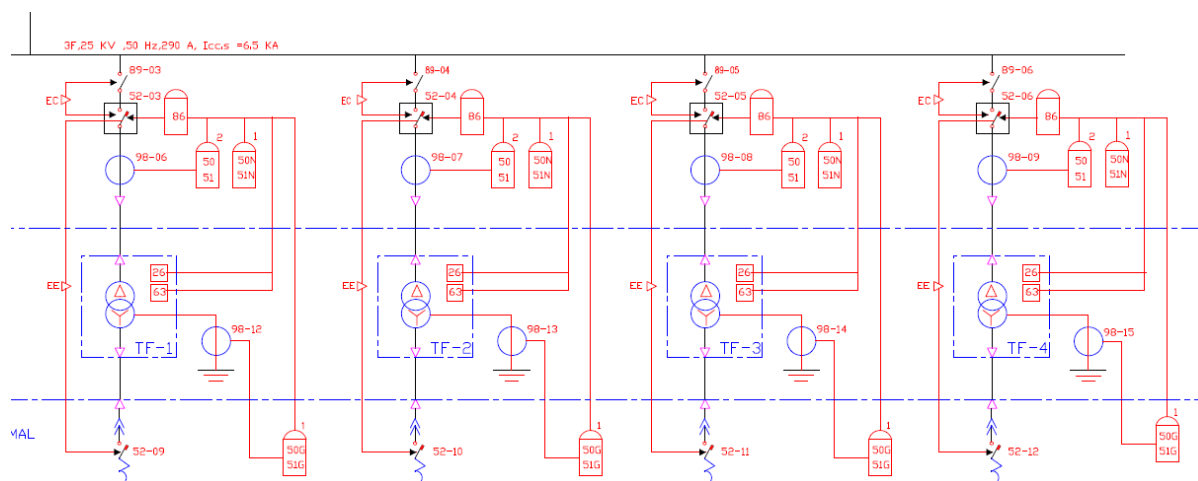
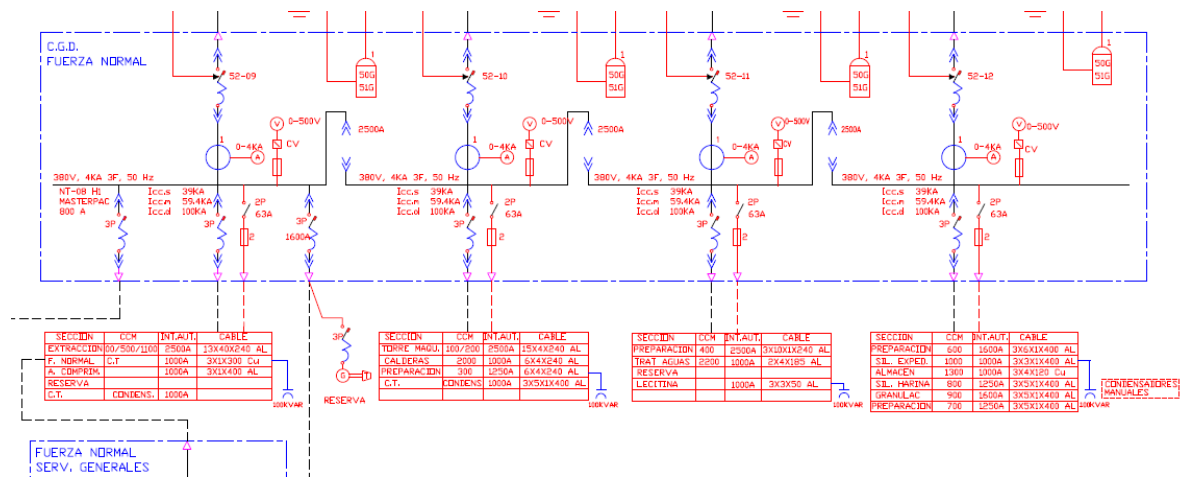


Diagrama unifilar: Cuadre general de distribución i secciones de cada transformador



ANNEX 3: RESUM NORMATIVES

- **UNE-EN 61642:** Xarxes industrials de corrent alterna afectada per harmònics. Ús de filtres i de condensadors a instal·lar en paral·lel.

Indicacions per l'ús de filtres passius en corrent alterna i condensadors en paral·lel. Té per objectiu limitar els harmònics i compensar la potència reactiva en instal·lacions industrials de de baixa i alta tensió

- **UNE-EN 50160:** Característiques de la tensió subministrada per les xarxes públiques de distribució.

Defineix les característiques de la tensió subministrada en el punt de connexió a una xarxa pública de distribució en BT i MT. Especifica els valors màxims de la distorsió harmònica individual en tensió.

Harmònics imparells no múltiples de 3		Harmònics imparells múltiples de 3	
Rang (h)	$U_h(\%)$	Rang	$U_h(\%)$
5	6	3	5
7	5	9	1,5
11	3,5	15	0,5
13	3	21	0,5
17	2		
19	1,5		
23	1,5		
25	1,2		

Harmònics parells	
Rang(h)	$U_h(\%)$
2	2
4	1
6-24	0,5

- **UNE-EN 61000-2-2:** Compatibilitat electromagnètica, entorn, nivells de compatibilitat per les perturbacions conduïdes a baixa freqüència i la transmissió de senyals en les xarxes públiques d'alimentació en BT.

Restringeix els harmònics de tensió:

- Si $TDHu > 8\%$: Contaminació important. És necessari actuar.
- Si $5\% < TDHu < 8\%$: Contaminació significativa i possibilitat de funcionament defectuós.
- Si $TDHu < 5\%$: Situació acceptable

Restringeix els harmònics en corrent:

- Si $TDHi > 50\%$: contaminació important. És necessari actuar
- $10\% < TDHi < 50\%$: Contaminació significativa i possibilitat de funcionament defectuós.
- Si $TDHi < 10\%$ situació acceptable

Adicionalment els harmònics d'ordre 3 superiors al 50% recorreran el conductor del neutre, escalfant-lo significativament. Els harmònics d'ordre 5 i 7 superiors al 40% pertorben els condensadors i receptors d'alta sensibilitat.

- **UNE-EN 61000-2-4:** Compatibilitat electromagnètica, entorn, nivells de compatibilitat en instal·lacions industrials de potencia, BT/MT a 50/60Hz.

Classifica els nivells de compatibilitat per diferents entorns electromagnètics.

- Classe 1: xarxes protegides amb nivells de compatibilitat inferiors a la xarxa pública.
- Classe 2: entorns industrials on els nivells són iguals al de la xarxa pública.
- Classe 3: entorn industrial sever.

- **UNE-EN 61000-3-2:** Compatibilitat electromagnètica, límits d'emissió de corrent harmònics (per aparells d'intensitat d'entrada inferior a 16A per fase).

La norma és aplicable a aparells elèctrics connectats a 50/60 Hz, 240 en monofàsic o 415 en trifàsic.

Defineix els límits de corrent harmònica i està en sintonia amb la norma UNE-EN 61000-2-2

- Classe A: aparell trifàsic equilibrat i qualsevol definició no explicitada en les altres classes.
- Classe B: eines portàtils
- Classe C: aparells d'il·luminació
- Classe D: aparells de potència menor a 600 W i corrent d'entrada espectral.

ANNEX 4: FITXES TÈCNIQUES

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

VarSet Premium automática SAH

Baterías de condensadores VarSet Premium SAH con inductancias antiarmónicos, 190Hz



Armario VLVAEP

Schneider Electric,
siempre, hace referencia a
la potencia útil a la tensión
de servicio, independientemente
de la tensión de dimensionamiento
de los condensadores.

Con interruptor automático en cabecera

Presentación

Las baterías VarSet Premium son equipos de compensación automática que se presentan en cofre o armario, según la potencia del equipo.

Características

- Tensión asignada: 400 V trifásicos a 50 Hz
- Tensión nominal del condensador: 480 V
- Tolerancia sobre la capacidad: - 5, + 10%
- Escalón formado por:
 - Condensador VarplusCan HDuty con:
 - Sistema de sobrepresión
 - Resistencia de descarga: 50 V 1 minuto
- Contactores específicos para la maniobra de condensadores
- Fusibles tipo gG
- Inductancia antiarmónica, sintonización 189 Hz (3,78)
- Regulador energía reactiva serie Varplus Logic, con comunicación Modbus integrada
- Interruptor automático Compact
- Nivel de aislamiento:
 - 0,69 kV, hasta 200 kVA y 0,8 kV para > 200 kVA
- Resistencia 50 Hz 1 minuto: 8 kV
- Corriente máxima admisible: 1,19 In (400 V)
- Tensión máxima admisible (8 h sobre 24 h, según IEC 60831): 1,1Un
- Valor de la Icc del embarrado: 35 kA
- Grado de protección: IP31
- Grado de resistencia mecánica: IK10
- Pérdidas: inferiores a 6 W/kVA
- Categoría de temperatura (400 V):
 - Temperatura máxima: 40 °C
 - Temperatura media sobre 24 h: 35 °C
 - Temperatura mínima: - 5 °C
- Humedad: hasta el 95%
- Altitud máxima: 2.000 m.
- Autotransformador 400/230 V integrado
- Protección contra contactos directos (puerta abierta). IPxxB
- Color: RAL 7035
- Normas: IEC 61439-1/2, IEC 61921
- Fijación:
 - Armario: fijación al suelo
- Conexión del cableado de potencia por la parte inferior mediante tapa pasacables
- El TI (5 VA s 5 A) no se suministra, a instalar aguas arriba de la batería y de las cargas
- No es necesario prever tensión auxiliar 230 V/50 Hz para alimentar las bobinas de los contactores

Los equipos de más de 600 kVA, son 2 armarios independientes (maestro – esclavo) cada uno con su acometida de potencia; y cada acometida con el interruptor automático correspondiente.

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

VarSet Premium automática SAH

Baterías de condensadores VarSet Premium SAH con inductancias antiarmónicos, 190Hz

Referencias	Q (kVar)	Escalón más pequeño	Regulación	Núm. de pasos eléctricos	Núm. de pasos físicos	Icu	Interrupción de cabecera	Armario	P.V.R. €
Con interruptor automático en cabecera									
Fijación suelo - acometida inferior									
VLVAF2P03506AA	50	12.5	12.5 + 12.5 + 25	4	3	50 kA	NSX250N 250A	VLVAF2P	8.096,00
VLVAF2P03507AA	75	25	25 + 50	3	2		NSX250N 250A		8.320,00
VLVAF2P03508AA	100	25	25 + 25 + 50	4	3		NSX250N 250A		8.360,00
VLVAF2P03509AA	125	25	25 + 50 + 50	5	3		NSX250N 250A		8.418,00
VLVAF2P03531AA	137.5	12.5	12.5 + 25 + 50 + 50	11	4		NSX250N 250A		9.144,00
VLVAF2P03510AA	150	25	25 + 25 + 50 + 50	6	4		NSX400N 400A		9.348,00
VLVAF2P03511AA	175	25	25 + 50 + 100	7	3	50 kA	NSX400N 400A		9.588,00
VLVAF2P03512AA	200	50	50 + 50 + 100	4	3		NSX400N 400A		9.810,00
VLVAF3P03513AA	225	25	25 + 50 + 50 + 100	9	4		NSX630N 630A	VLVAF3P	12.646,00
VLVAF3P03514AA	250	50	50 + 2x100	5	3		NSX630N 630A		12.824,00
VLVAF3P03515AA	275	25	25 + 50 + 2x100	11	4		NSX630N 630A		14.542,00
VLVAF3P03516AA	300	50	50 + 50 + 2x100	6	4		NSX630N 630A		14.828,00
VLVAF5P03517AA	350	50	50 + 3x100	7	4		NS800N	VLVAF5P	16.930,00
VLVAF5P03518AA	400	50	50 + 50 + 3x100	8	5		NS800N		18.040,00
VLVAF6P03519AA	450	50	50 + 4x100	9	5		NS1000N	VLVAF6P	19.708,00
VLVAF6P03520AA	500	50	50 + 50 + 4x100	10	6		NS1250N		20.994,00
VLVAF6P03521AA	550	50	50 + 5x100	11	6		NS1250N		23.184,00
VLVAF6P03522AA	600	50	6 x 100	6	6		NS1600N		22.676,00
VLVAF8P03534AA	700	50	50 + 50 + 6x100	14	8	65 kA	NS630BH+NS1000H	VLVAF8P	34.294,00
VLVAF8P03535AA	800	50	50 + 50 + 7x100	16	9		NS630BH+NS1000H	(2 acometidas)	38.180,00
VLVAF8P03536AA	900	50	50 + 50 + 8x100	18	10		NS800H+NS1000H		40.526,00
VLVAF8P03537AA	1000	50	50 + 50 + 9x100	20	11		NS800H+NS1000H		42.688,00
VLVAF8P03538AA	1100	50	50 + 50 + 10x100	22	12		NS1000H+NS1250H		45.092,00
VLVAF8P03539AA	1150	50	50 + 11x100	23	12		2xNS1250H		46.058,00

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

VarSet Premium automática SAH

Baterías de condensadores VarSet Premium SAH con inductancias antiarmónicos, 190Hz



Armario VLVAFP

Schneider Electric,
siempre, hace referencia a
la potencia útil a la tensión
de servicio, independientemente
de la tensión de dimensionamiento
de los condensadores.

Sin interruptor automático en cabecera

Presentación

Las baterías VarSet Premium son equipos de compensación automática que se presentan en cofre o armario, según la potencia del equipo.

Características

- Tensión asignada: 400 V trifásicos a 50 Hz
- Tensión nominal del condensador: 480 V
- Tolerancia sobre la capacidad: - 5, + 10%
- Escalón formado por:
 - Condensador VarplusCan HDuty con:
 - Sistema de sobrepresión
 - Resistencia de descarga: 50 V 1 minuto
 - Contactores específicos para la maniobra de condensadores
- Fusibles tipo gG
- Inductancia antiarmónica, sintonización 189Hz (3,78)
- Regulador energía reactiva serie Varplus Logic, con comunicación Modbus integrada
- Nivel de aislamiento:
 - 0,69 kV, hasta 200 kVAr y 0,8 kV para > 200 kVAr
 - Resistencia 50 Hz 1 minuto: 8 kV
- Corriente máxima admisible: 1,19 In (400 V)
- Tensión máxima admisible (8 h sobre 24 h, según IEC 60831): 1,1Un.
- Valor de la Icc del embarrado: 35 kA (según envolvente)
- Grado de protección: IP31
- Grado de resistencia mecánica: IK10
- Pérdidas: inferiores a 6 W/kVAr
- Categoría de temperatura (400 V):
 - Temperatura máxima: 40 °C
 - Temperatura media sobre 24 h: 35 °C
 - Temperatura mínima: - 5 °C
- Humedad: hasta el 95%
- Altitud máxima: 2.000 m.
- Autotransformador 400/230 V integrado
- Protección contra contactos directos (puerta abierta). IPxxB
- Color: RAL 7035
- Normas: IEC 61439-1/2, IEC 61921
- Fijación:
 - Armario: fijación al suelo
 - Conexión del cableado de potencia por la parte inferior mediante tapa pasacables
 - El TI (5 VA s 5 A) no se suministra, a instalar aguas arriba de la batería y de las cargas
 - No es necesario prever tensión auxiliar 230 V/50 Hz para alimentar las bobinas de los contactores

Los equipos de más de 600 kVAr, son 2 armarios independientes (maestro – esclavo) cada uno con su acometida de potencia.

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

VarSet Premium automática SAH

Baterías de condensadores VarSet Premium SAH con inductancias antiarmónicos, 190Hz

Referencias	Q (kVar)	Escalón más pequeño	Regulación	Núm. de pasos eléctricos	Núm. de pasos físicos	Icw	Armario	P.V.R. €
Sin interruptor automático en cabecera								
Fijación suelo - acometida inferior								
VLVAF2P03506AB	50	12.5	12.5 + 12.5 + 25	4	3	35 kA/1s	VLVAF2P	7.482,00
VLVAF2P03507AB	75	25	25 + 50	3	2			7.648,00
VLVAF2P03508AB	100	25	25 + 25 + 50	4	3			7.780,00
VLVAF2P03509AB	125	25	25 + 50 + 50	5	3			7.754,00
VLVAF2P03531AB	137.5	12.5	12.5 + 25 + 50 + 50	11	4			8.460,00
VLVAF2P03510AB	150	25	25 + 25 + 50 + 50	6	4			8.522,00
VLVAF2P03511AB	175	25	25 + 50 + 100	7	3	35 kA/1s	VLVAF3P	8.834,00
VLVAF2P03512AB	200	50	50 + 50 + 100	4	3			9.188,00
VLVAF3P03513AB	225	25	25 + 50 + 50 + 100	9	4			12.366,00
VLVAF3P03514AB	250	50	50 + 2x100	5	3			12.574,00
VLVAF3P03515AB	275	25	25 + 50 + 2x100	11	4			13.444,00
VLVAF3P03516AB	300	50	50 + 50 + 2x100	6	4			13.720,00
VLVAF5P03517AB	350	50	50 + 3x100	7	4		VLVAF5P	14.798,00
VLVAF5P03518AB	400	50	50 + 50 + 3x100	8	5			15.884,00
VLVAF6P03519AB	450	50	50 + 4x100	9	5		VLVAF6P	18.420,00
VLVAF6P03520AB	500	50	50 + 50 + 4x100	10	6			19.746,00
VLVAF6P03521AB	550	50	50 + 5x100	11	6	65 kA/1s	VLVAF8P (2 acometidas)	20.734,00
VLVAF6P03522AB	600	50	6x100	6	6			21.416,00
VLVAF8P03534AB	700	50	50 + 50 + 6x100	14	8			31.758,00
VLVAF8P03535AB	800	50	50 + 50 + 7x100	16	9			35.376,00
VLVAF8P03536AB	900	50	50 + 50 + 8x100	18	10			36.148,00
VLVAF8P03537AB	1000	50	50 + 50 + 9x100	20	11			39.916,00
VLVAF8P03538AB	1100	50	50 + 50 + 10x100	22	12			42.262,00
VLVAF8P03539AB	1150	50	50 + 11x100	23	12			43.172,00

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

AccuSine PCSn, AccuSine PCS+, AccuSine PFV+

Filtros activos de armónicos. Tablas selección



AccuSine PCSn

AccuSine PCS+

AccuSine PFV+

Tabla elección filtro activo por función

	Armónicos Neutro	Armónicos de Fase	Corrección $\cos \phi$	Equilibrado cargas	Soporte tensión (vía inyección VAR)	Flicker	Condiciones entorno instalación
AccuSine PCSn	■	■	■	■			Terciario e industria ligera
AccuSine PCS+		■	■	■			Industria pesada
AccuSine PFV+			■	■	■	■	Industria pesada

Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos

AccuSine PCS+

Filtros activos

La solución de
Schneider Electric
para filtrado activo
de armónicos en
las instalaciones
industriales



AccuSine PCS+

Especificaciones técnicas

Rango de corrientes de salida (RMS)	60 A, 120 A, 200 A, 300 A - 380 V CA a 480 V CA 47 A, 94 A, 157 A, 235 A - 480-600 V CA 40 A, 80 A, 133 A, 200 A - 600-690 V CA
--	---

Características de la instalación eléctrica

Tensión nominal	380-480 V CA; +10%-15% 480-600 V CA; +10%-15% 600-690 V CA; +10%-15%
Frecuencia nominal	50/60 Hz, ± 3 Hz detección automática
Número de fases	3-fases, con o sin neutro
Funcionamiento con cargas monofásicas	Si; ningún efecto sobre la corriente de neutro

Características técnicas del equipo

Electrónica de potencia	IGBT; inversor de 3 niveles
Topología	Digital armónicos FFT (Transformada rápida de Fourier) Digital energía reactiva
Pérdidas	A 480 V CA < 3%; y a 690 V CA < 5%
Transformadores de intensidad (TI)	Cualquier relación, con 1 o 5 amperios en el secundario Precisión tipo 1 50/60 o 400 Hz Conectado a tierra
Cantidad de TIs	2 o 3 para instalaciones de 3 hilos 3 para instalaciones de 4 hilos
VA del TI con carga	15 mVA
Cancelación espectro	Del H2 al H51, discreta; totalmente seleccionable por orden armónico (amplitud y on/off)
Forma de control	Lazo cerrado para nuevas instalaciones ⁽¹⁾ Lazo abierto compatible para la renovación / actualización de aplicaciones
Posición TIs	Lazo cerrado: TI en sentido red o TI en sentido carga para un único equipo ⁽²⁾ Lazo abierto: TI en sentido de la carga o TI sentido red, para un único equipo ⁽²⁾
Atenuación armónica	Lazo cerrado: < 3% THD(i); máx 20:1 THD(i) reducción con carga armónica de corriente superior al 50% del valor del filtro activo AccuSine PCS+ Lazo abierto: < 5% THD Requiere una impedancia inductiva del 3% o mayor para cada carga no lineal
Características operacionales	THDv % objetivo THDi % objetivo
Exceso inyección armónica	Se detiene la inyección armónica de un rango específico, si hay resonancia o se detecta falta de impedancia; también se puede detener manualmente
Equipos en paralelo	Hasta 10 unidades por cada conjunto de TI (hasta H51), con cualquier combinación de tamaño y compatibles con gamas anteriores de filtros AccuSine PCS. Si hay necesidad de más de 10 unidades en paralelo, consultar
Posibilidades de funcionamiento en paralelo	Maestro/Maestro Maestro/Eslavo Multi-Maestros/multi-esclavos Igual que AccuSine PCS para ampliaciones / sustituciones
Opciones de secuencias en paralelo	Lead/lag con rotación de equipo: un equipo inyecta la capacidad total, antes que la siguiente unidad inyecte; rotación programada. Load Share: Todas las unidades funcionan con el mismo porcentaje de inyección (salida)
Redundancia paralela	Cualquier equipo con conexión a los TI se convierte de forma automática en maestro, si el equipo definido inicialmente como maestro queda fuera de servicio. Aumento automático en la inyección en todos los equipos para compensar la capacidad del equipo fuera de servicio.
Control por HMI en las unidades en paralelo	Cualquier equipo permite la visualización y el cambio de configuración de los parámetros del conjunto o de un equipo que forme parte del conjunto
Comunicaciones en paralelo	Proprietario COM Bus entre las unidades en servicio
Corrección del factor de potencia	Capacitivo (Leading) o inductivo (lagging), para conseguir el Cos ϕ objetivo
Equilibrado de cargas	Inyección de corriente de secuencia negativa para equilibrar la corriente fundamental en la red como consecuencia del desequilibrio de las cargas (inherentemente también se corrige el Cos ϕ)
Tiempo de respuesta	25 μ s
Tiempo corrección armónico	2 ciclos
Tiempo corrección reactiva	1/4 ciclo
Pantalla	144 mm QVGA TFT 64k-pantalla táctil en color
Idiomas	Inglés
Interface	Magelis HMI STU pantalla táctil
Parámetros visualizados en pantalla	THDi, THDv, osciloscopio para la visualización de los parámetros seleccionados, diagrama de fases, potencia de la carga, corrientes medidas Ih, Is, It, I; secuencia negativa, PF (Cos ϕ), corrientes inyectadas Ih, I reactiva, I secuencia negativa, etc.

(1) Por defecto y método de control preferido.

(2) TIs auxiliares necesarios para equipos en paralelo con los TIs en sentido de la carga.

(3) TIs auxiliares necesarios para equipos en paralelo con los TIs en sentido de la red (fuente).

AccuSine PCS+

Comunicaciones	Modbus RTU, Modbus TCP/IP
Entradas / salidas	4 entradas y 4 salidas, contactos secos; asignables
Nivel ruido (ISO3746)	<70 db a un metro del equipo
Color	RAL7035 Envoltente; RAL7022 zócalo
Sistemas de Tierra	Soporta TT, TN, e IT Filtro EMC para sistemas IT
Condiciones ambientales	
Temperaturas de funcionamiento	Entre 0 °C y 40 °C Reducción de la capacidad nominal un 2% por cada grado centígrado hasta los 50 °C
Humedad relativa	Hasta un 95%, sin condensación
Calificación sísmica	Cumple con IBC y ASCE7
Altitud de funcionamiento	1.000 m (Reducción de la capacidad nominal un 1% cada 100 m), máx. 4.800 m.
Reversión automática de salida	Ocurre cada vez que el sensor de temperatura del disipador de calor supera el límite de temperatura
Parada por temperatura ambiente	Parada del equipo si la temperatura de entrada de aire alcanza 51 °C
Límites de salida predefinidos (rms)	Límite establecido programable por altitud o temperatura ambiente - se convierte en límite de salida fija
Condiciones de almacenaje (con el embalaje original)	Temperatura: -20 °C a 60 °C Humedad relativa: hasta el 95%, sin condensación Limpio, seco y protegido No están permitidas partículas conductoras
"Niveles de contaminación en funcionamiento (IEC 60721-3-3)"	Química, clase 3C2 Mecánica clase 3S2 No están permitidas partículas conductoras
"Niveles de contaminación - transporte y almacenaje (IEC 60721-3-3)"	Química, clase 3C3 Mecánica clase 3S3 Cuando se encuentra embalado con su embalaje original No están permitidas partículas conductoras
Normativa	
Diseño	Certificación CE EMC , IEC/EN 60439-1, EN 61000-6-4 Class A, EN 61000-6-2
Índice protección	IP31, IP54
Normativa/ Certificaciones	cULus (UL508 , CSA 22.2 No. 14) Certificación CE , ABS, Lloyds
Instalación	
Suelo	IP31, IP54
Protecciones	Interruptor automático o fusibles (mínimo In 3 1,25)
AIC Rating	hasta 415 V CA - 200 kA cULus; 125 kA IEC hasta 480 V CA - 200 kA cULus; 75 kA IEC hasta 600 V CA - 100 kA cULus; 100 kA IEC hasta 690 V CA - no cULus rating; 100 kA IEC
Entrada cables	Parte superior o inferior con placa pasacables
Configuración refrigeración	Cámaras de aire independientes para la sección del disipador de calor y la sección de las PCBA. Disipador térmico, entrada por abajo salida por arriba. Todos los componentes clasificados para IP54 o superior => sin filtro requerido. La entrada de aire para las PCBA debe estar limpia y seca (puede ser necesario filtro). No están permitidas partículas conductoras
Prestaciones	
HMI (Magelis STU)	Salida con un lenguaje sencillo (no hay códigos crípticos). Puerto USB para la carga de nuevo software y transferencia de registros operacionales
Puerto de servicio	Puerto USB: puesta en servicio, programación, o diagnóstico a través de un ordenador portátil; (el portátil proporciona energía a la tarjeta de control cuando no hay alimentación en la unidad)
Puesta en marcha	En campo, proceso paso a paso; detección automática del TI, rotación de fases y polaridad; relación del transformador externo y cambio de fase, test de temperatura, etc.

Pressupost filtre actiu

Referencia	Uds	Descripción	PVP Unidad (€)
PCSP300D5IP54	1	PCS+ 300A 380-480 VAC IP54	47.826,00
PCSP300D5IP31	1	PCS+ 300A 380-480 VAC IP31	46.800,00